
В. И. Кузнецов

ученые — школьнику
ДЭ

Свет



ВЛАДИСЛАВ ИВАНОВИЧ КУЗНЕЦОВ, кандидат технических наук, научный сотрудник Государственного оптического института имени С. И. Вавилова.

Родился в 1928 г., окончил инженерно-физический факультет Ленинградского электротехнического института имени В. И. Ульянова-Ленина в 1951 г.

Специалист по оптическим явлениям в воде и атмосфере, автор ряда оригинальных оптических приборов для исследования светорассеивающих сред, В. И. Кузнецов разрабатывал теоретические основы распределения света в мутных средах.

В. И. Кузнецов — соавтор двух открытий в области фундаментальных физических исследований.

Библиотечка Детской энциклопедии

ученые ДЭ школьнику

Редакционная коллегия:
И. В. Петрянов (главный редактор),
И. Л. Кнунянц,
А. Л. Нарочницкий

В. И. Кузнецов

Свет





Москва
«Педагогика», 1977

535
К89

Главная редакция Детской энциклопедии:

Артоболевский И. И.
Банников А. Г.
Благой Д. Д.
Брусничкина Р. Д.
Буцкус П. Ф.
Ворожейкин И. Е.
Воронцов-Вельяминов Б. А.
Генкель П. А.
Герасимов С. А.
Гончаров А. Д.
Горшков Г. П.
Данилов А. И.
Джибладзе Г. Н.
Долинина Н. Г.
Дубинин Н. П.
Иванович К. А.
Измайлов А. Э.
Кабалевский Д. Б.
Кедров Б. М.
Ким М. П.
Кузин Н. П.
Кузовников А. М.
Леонтьев А. Н.
Лурия А. Р.
Михалков С. В.
Нечкина М. В.
Паначин Ф. Г.
Петрянов И. В.
Разумный В. А.
Соловьев А. И.
Тимофеев Л. И.
Тихвинский С. Л.
Тяжельников Е. М.
Хачатуров Т. С.
Цаголов Н. А.
Царев М. И.
Чепелев В. И.

Кузнецов В. И.

К 89 Свет. М., «Педагогика», 1977.

128 с. с ил. (Библиотечка Детской энциклопедии «Ученые — школьнику»).

В какой форме Земля получает энергию, обеспечивающую развитие жизни на нашей планете? Какие эксперименты легли в основу создания теории относительности и квантовой механики? Как измерили температуру и определили состав звездного вещества? Книга «Свет» отвечает на эти вопросы.

В ней рассказывается об основных опытах, в которых были раскрыты тайны светового луча, о современной оптической науке.

В книге в популярной форме изложены физические принципы действия лазеров, рассказано о главных направлениях их применения: голографии, оптической связи, лазерного термоядерного синтеза.

К $\frac{60700\text{-}057}{005(01)\text{-}77}$ 39-77 535

© Издательство «Педагогика», 1977

О свете

Жизнь на Земле возникла и существует благодаря лучистой энергии солнечного света. Если бы на нашей планете не было атмосферы, которая лишь частично пропускает энергию Солнца к земной поверхности, то в полдень на поверхность земного шара падало бы 8,37 Дж на 1 $см^2$ за минуту. Эта величина называется **солнечной постоянной** и определена по измерениям вне атмосферы с помощью приборов, установленных на ракетах.

Можно подсчитать, что за одну секунду свет приносит на нашу планету энергию, которая выделилась бы при сгорании 40 млн. т каменного угля.

Костер первобытного человека, нефть, сгорающая в двигателях машин, топливо космической ракеты — все это световая энергия, запасенная когда-то растениями и животными. Остановись солнечный поток, и на Землю выпадут дожди из жидкого азота и кислорода. Температура приблизится к абсолютному нулю. Семиметровый панцирь из замерзших атмосферных газов покроет земную поверхность. Только иногда в этой ледяной пустыне встретятся лужицы жидкого гелия.

Не только энергию несет на Землю свет. Благодаря световому потоку мы воспринимаем и познаем окружающий мир. Лучи света сообщают нам о положении близких и отдаленных предметов, об их форме и цвете.

Свет, усиленный оптическими приборами, открывает человеку два полярных по масштабам мира: космический мир с его огромными протяженностями и микроскопический, населенный не различимыми простым глазом мельчайшими организмами.

Когда великий итальянский ученый Г. Галилей направил построенный им телескоп в небо, он открыл мир громадных, ни с чем до того не сравнимых протя-

женностей. Сопоставив движение спутников Юпитера, которое он наблюдал с помощью телескопа, с движением планет, Галилей на опыте убедился в правильности предсказанной Коперником «системы» мира. Ему удалось увидеть фазы Венеры, различить отдельные звезды Млечного Пути.

Сегодня построены совершенные телескопы, в которые видны звезды, светящиеся в миллион раз слабее звезд, различимых невооруженным глазом; найдены способы узнавать по характеру светового потока, какие химические элементы содержатся в излучающем теле, какова его температура, магнитное поле, скорость.

Получается так, что в звездном свете содержатся данные о строении звезды, о составе космического вещества и о многом другом, с чем соприкасался свет. Разлагая собранный телескопом свет на отдельные составляющие, астрономы расшифровали разнообразные сведения, записанные на световой волне, обнаружили в космосе раньше, чем в земных лабораториях, два химических элемента — солнечный гелий и звездный технеций. Был установлен замечательный факт. Оказалось, что звездное вещество состоит из точно таких же атомов, как и земное.

Анализ состава света, испускаемого отдаленными скоплениями звезд — галактиками, привел к неожиданному открытию: галактики «разбегаются» друг от друга с очень большой скоростью, а это означает расширение нашей Вселенной!

Почти через 50 лет после первых астрономических открытий Галилея голландец А. Левенгук заглянул в каплю воды через изготовленные им микроскопы и открыл удивительный микроскопический мир.

Почти 300 лет с момента открытия Левенгука световая волна служит для исследования не видимых простым глазом мельчайших объектов. За это время ученые поняли значение бактерий и зеленого вещества — хлорофилла для жизни, доказали клеточное строение

живых организмов, открыли вирусы, создали целые разделы наук, которые мы смело можем назвать микроскопическими, как, например, наука о клетке — цитология.

Конечно, не только проникновению в космический и микроскопический миры мы обязаны свету. Ничуть не меньше значение светового луча и в других областях деятельности человека. Оптические приборы, даже если они установлены на летящем высоко самолете, определяют сорт нефти, разлитой по поверхности моря. В руках хирурга лазерный луч становится световым скальпелем, пригодным для сложных операций на сетчатке глаза. Этот же луч на металлургическом заводе режет массивные листы металла, а на швейной фабрике раскраивает ткани. Световой луч передает сообщения, тонко и деликатно управляет химическими реакциями.

О том, как решались и решаются наукой эти задачи, и пойдет речь. Но вначале попробуем ответить на вопрос: что такое свет?

Что мы называем словом «свет». Если быть точным, то нужно сказать, что светом называют электромагнитное излучение, воспринимаемое человеческим глазом. Длины волн этого излучения очень малы и заключены в узком интервале — от 0,38 до 0,77 мкм. Иногда физики называют светом и невидимые электромагнитные волны, которые лежат за пределами этого участка. Дело в том, что излучения с длиной волны от 0,01 мкм до 340 мкм во многих случаях ведут себя одинаково.

Академик С. И. Вавилов в книге «Глаз и Солнце» писал: «Существует бесконечное разнообразие явлений, которые нам придется назвать световыми и которые невидимы».

Физические свойства невидимых электромагнитных волн близки к свойствам световых волн, хотя наш глаз и не чувствует их.

Одно из основных свойств света, известное еще в глубокой древности, — прямолинейное распространение его лучей. Так, через большое отверстие луч распространяется прямолинейно. Экран, поставленный перед источником света, образует четкую тень (рис. 1а). Прямолинейным распространением световых лучей объясняются многие интересные явления.

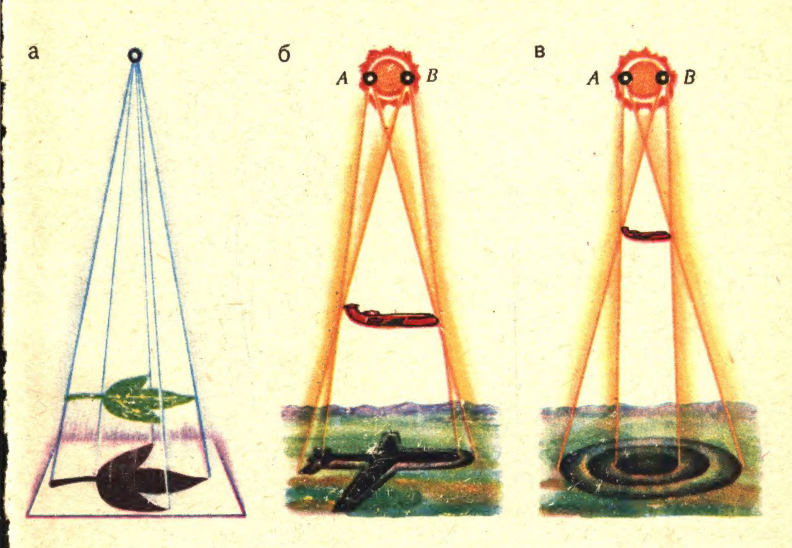
Самолет и Солнце. После взлета за самолетом по бескрайним лугам и полям устремляется его тень. Некоторое время она в точности повторяет очертания реактивного лайнера, затем, с набором самолетом высоты, тень начинает изменяться — приобретает неопределенные очертания и наконец превращается в круг. Чем объяснить изменения, происходящие с тенью?

Солнечные лучи от крайних точек солнечного диска А и Б падают на самолет под разными углами. Если бы светили только эти две точки, то получились бы две смещенные тени самолета. На малых высотах это смещение невелико, и получается четкая тень. На средних высотах смещения ведут к размазыванию тени самолета (рис. 1б). На больших высотах тень самолета заполнит круг, повторяющий по форме солнечный диск (рис. 1в). Элементарные «тени» от каждой точки солнечного диска образуют его теневое изображение. Получается, что при определенных геометрических условиях непрозрачный экран может служить простейшей оптической системой.

Самый простой фотоаппарат. С помощью световых лучей можно построить не только теневое изображение. Так, если в абажуре лампы есть небольшое отверстие (рис. 2), то на потолке появится световая полоса, напоминающая подкову. Это — изображение раскаленной вольфрамовой нити. Как оно получилось? Каждый малый участок нити 1, 2, 3... образует луч 1—1′, 2—2′, 3—3′... Эти лучи на потолке дадут малые пятна

Рис. 1 а. Экран перед источником света.

Рис. 1 б, в. Изменение формы тени с высотой полета самолета.



(рис. 2а), из которых и образуется изображение всей нити.

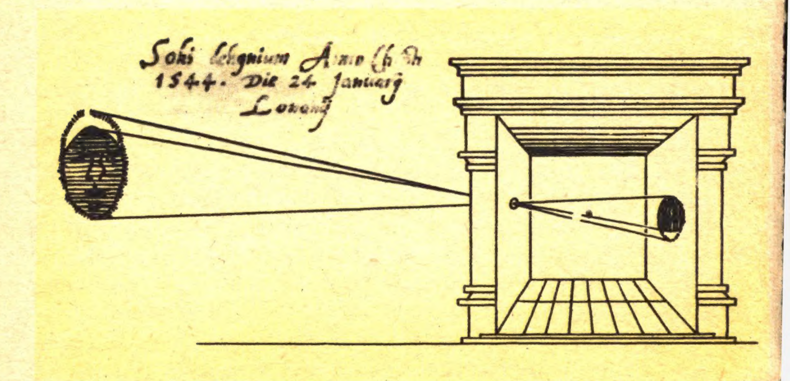
Проделайте такой опыт сами. Если лампу закрыть темным материалом так, чтобы потолок не подсвечивался, то получится изображение не только нити, но и баллона лампы.

В летний день в тени дерева у всех светлых пятен на дорожке одинаковые очертания. Каждый из небольших просветов дает на почве изображение Солнца (рис. 2б).

Нетрудно самостоятельно сделать камеру-обскуру (рис. 3). В небольшом ящике нужно проделать отверстие (около 0,1 мм). Если в противоположную стенку вставить матовое стекло, то на нем возникнет изображение предмета, находящегося перед отверстием камеры. Если матовое стекло заменить светочувстви-

Рис. 2 а, б. Изображение светящихся тел.

Рис. 3. Камера-обскура. (Чертеж с рисунка 1544 г.)



тельной пластинкой, то светочувствительный слой «запомнит» изображение. Останется проявить фотопластинку — и готов негатив. Так в старину с помощью камеры-обскуры получали фотографии, или, как их тогда называли, дагерротипы.

Волна или корпускулы? Мы объясняли рассмотренные явления, считая, что свет распространяется прямолинейно. Но почему свет движется по прямой? Великий английский ученый И. Ньютон объяснял это тем, что свет состоит из летящих частиц—корпускул. Современник Ньютона Х. Гюйгенс, напротив, предполагал, что свет волновой природы. Тому были свои причины. Из представлений о свете как о волне Гюйгенс довольно просто получил законы преломления и отражения света, двойного лучепреломления в исландском шпате. Труднее было обосновать «очевидный» закон прямолинейного распространения света с волновой точки зрения.

Бросим в воду камень. От него разойдутся волны. Пройдя щель, установленную на их пути, волны также бегут во все стороны (рис. 4а). Но световой луч распространяется через отверстие прямолинейно (рис. 4б).

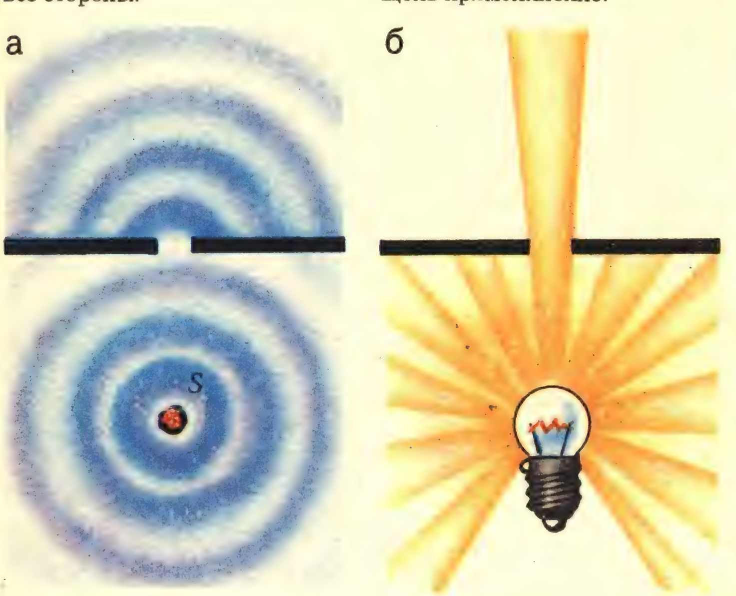
Чтобы представления о свете как о волновом процессе приобрели право на жизнь, нужно было объяснить прямолинейное распространение света с волновой точки зрения. Такое объяснение дал французский ученый О. Френель.

Мемуар Френеля. В 1818 г. на одном из заседаний Парижской академии наук рассматривался мемуар Френеля (так назывались доклады, представляемые в академию). В докладе свет рассматривался как волновое явление и при этом объяснялось прямолинейное распространение света.

Если в точке A (рис. 5), центре сферы S, поместить точечный источник света, рассуждал Френель, то свето-

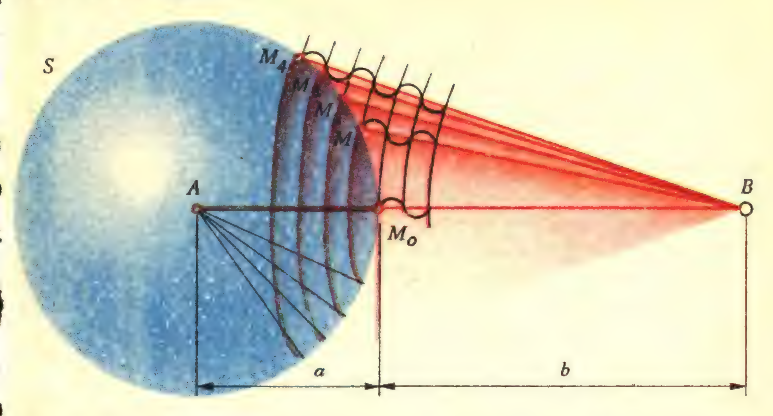
Рис. 4 а. Камень упал в воду в точке S. Точка стала источником волн. Если на пути волн поставить преграду с узкой щелью, то от щели волны будут расходиться во все стороны.

Рис. 4б. Световой луч от источника света пойдет через щель прямолинейно.



вые волны от него будут одновременно доходить до поверхности S. Из каждой точки этой сферы в точку B приходят световые волны и складываются там по законам сложения волн. Можно как бы забыть о существовании источника A и считать источником световых волн сферу S. Чтобы вычислить общее действие волн, Френель разбил поверхность сферы на зоны. Центр зон лежал в точке пересечения поверхности S и луча света AB, идущего из источника A в точку B. Френель выбрал

Рис. 5. Зоны Френеля.



ширину зон так, что расстояния от внешней и внутренней границ каждой зоны до точки B отличались на половину длины световой волны:

$$M_1B - M_0B = M_2B - M_1B = \ldots = \frac{\lambda}{2}.$$

При таком делении на зоны их площадь оказывается одинаковой. А это означает, что соседние зоны испускают в направлении точки B примерно одинаковое количество света. С другой стороны, свет соседних зон проходит пути, отличающиеся на половину длины волны, и при сложении световых потоков соседних зон они ослабляют друг друга. Обозначим световые потоки от нулевой и последующих зон как H_0, H_1, H_2... Так как H_1, H_3 отстают на половину длины волны от потоков H_0, H_2, то по правилам сложения колебаний их нужно взять со знаком «минус» при сложении всех волн в точке B. Тогда получим: $H_0 - H_1 + H_2 - H_3 + H_4 - \ldots$ $H_0 - (H_1 - H_2) - (H_3 - H_4) - \ldots = H_0$. Выражения в скобках очень малы, и действие световой волны точечного

источника A в точке B определяется только нулевой зоной H_0. Площадь зоны Френеля равна $\frac{ab}{a+b}\cdot\lambda$, и для волны зеленого света, длина которой 0,5 мкм, составляет всего 0,0005 см², если $a=b=20$ см. Эта площадь равна площади сечения канала, по которому идет свет от A к B. Френелю удалось показать, что свет, несмотря на волновую природу, распространяется по узкому прямолинейному каналу. Получалось, что **закон прямолинейного распространения света** не противоречил волновой теории.

Присутствовавший на заседаниях академии французский математик С. Пуассон, выслушав Френеля, указал на любопытное обстоятельство, вытекавшее из доклада: если перед точечным источником света поставить маленький непрозрачный круглый экран с очень ровными краями, то в центре тени должно было бы появиться светлое пятно. По мнению Пуассона, это противоречило здравому смыслу. Однако, когда перед членами академии был поставлен опыт, в центре теневого круга возникло световое пятно! Свет обогнул препятствие! С этого момента волновая теория света заняла прочное место в науке — спор между идеями Ньютона и Гюйгенса, длившийся более столетия, на долгое время был решен в пользу волновых представлений.

Самая большая скорость. Как ни старались люди измерить скорость света еще в далекие времена, ничего из таких попыток не получалось. Только в 1676 г. датский астроном О. Рёмер, наблюдая затмение спутника Юпитера, нашел способ вычисления скорости света в пустом пространстве — **вакууме.**

Трудности измерения связаны с очень большой величиной скорости света. За миллионную долю секунды свет проходит 300 м. За 8 мин пробегает расстояние от Земли до Солнца, а ведь это 150 млн. км! По современным измерениям световая скорость в вакууме равна 299 792 км/с.

Рис. 6. Независимость световой скорости от скорости источника.



Оказалось, что скорость света ооладает удивительным свойством — она не зависит от скорости источника. Такой вывод был сделан из опытов А. Майкельсона.

Что же означает независимость скорости от движения источника? Допустим, на корабле, который стоит на якоре, по цели стреляет носовая пушка и при этом скорость снаряда равна $v_с$ (рис. 6). Затем корабль двинулся к цели со скоростью $v_к$. Новый выстрел. Теперь снаряд летит к цели со скоростью $v_с + v_к$. Выпущенный в это же самое время снаряд из кормовой пушки будет двигаться со скоростью $v_с — v_к$. Иными словами, при стрельбе по направлению хода скорость корабля прибавляется к скорости снаряда, а при стрельбе в противоположном направлении — вычитается. А свет прожекторов, установленных на мачтах, дойдет до равностоящих от корабля пунктов *A* и *B* одновременно, с какой бы скоростью ни шел корабль.

Получается, что свет не подчиняется простому правилу сложения скоростей. Этот результат — один из краеугольных камней современной физики. В основе теории относительности, созданной великим физиком А. Эйнштейном, лежит факт, полученный опытным путем: независимость скорости света от скорости источника. Одно из главных положений теории относитель-

ности заключено в том, что в природе не существует скорости, большей скорости света в вакууме. Эта самая большая, или предельная, скорость.

Другое важнейшее следствие теории относительности — связь между массой и энергией. Эйнштейн установил, исходя из основных положений теории относительности, что энергия содержится в скрытой форме в любом веществе, причем массе m соответствует энергия E, равная произведению массы на квадрат скорости света: $E = mc^2$. Эта формула помогает понять многие физические процессы, с ее помощью рассчитывают энергию атомного ядра, ядерных реакций.

Глаз и его вооружение

Окно в мир. Свет не только создал все живое. Щедрость светового потока открывает нам красоту окружающей нас природы, мы видим далекие галактики — огромные скопления звезд — и мельчайшие бактерии, измеряем высокие температуры и большие расстояния. И во всем этом в конечном итоге главную роль играет человеческий глаз. Поэтому люди всегда интересовались устройством человеческого глаза.

Еще в 1604 г. немецкий астроном И. Кеплер сравнил глаз с камерой, дающей изображение на вогнутой поверхности сетчатой оболочки глаза. Р. Декарт, французский математик и философ, относившийся к следующему поколению ученых, проверил это предположение на опыте. Он взял бычий глаз и вставил его в отверстие в закрытых оконных ставнях. Предварительно радужная оболочка глаза была обработана так, что стала прозрачной. На ней Декарт и увидел перевернутое изображение части улицы перед своим домом.

В наше время оптическую систему глаза часто сравнивают с фотоаппаратом, и не без оснований. Объектив фотоаппарата создает изображение на фотопластинке, а оптика глаза — на глазной сетчатке — светочувствительном слое, передающем изображение в мозг. Перемещая объектив фотоаппарата вдоль оптической оси, можно получить на фотопластинке четкое изображение предмета, поэтому объектив, как правило, подвижен. Хрусталик — главная линза — может изменять кривизну своей поверхности с помощью особых мышц. Поэтому, оставаясь неподвижным относительно сетчатки, хрусталик четко изображает на ней предметы, находящиеся на разных расстояниях.

В фотоаппарате диафрагма ограничивает пучок света, входящий в объектив. Глазной зрачок играет ту же

0,8
0,6
0,4
0,2

450 500 550 600 650

Смена 8

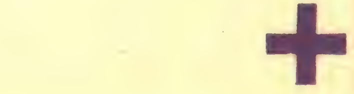


Рис. 7. Строение глаза и кривая спектральной чувствительности.

роль. В зависимости от величины светового потока, падающего на поверхность глаза, зрачок уменьшает или увеличивает свое отверстие помимо нашей воли. Так глаз защищается от излишней световой энергии, а когда ее недостаточно, увеличивает свою чувствительность.

Если перевести взгляд с темного на яркий предмет, то зрачки сужаются, уменьшается диаметр отверстия в радужной оболочке, в глаз попадает меньшая доля светового потока, и светочувствительный слой не перегружается.

Светочувствительный слой сетчатки состоит из элементов двух видов: колбочек и палочек. Световое раздражение от каждой из них передается в мозг по нервному волокну.

В сетчатке человеческого глаза 125 млн. палочек и 6 млн. колбочек! Только один участок на сетчатке не чувствителен к свету — слепое пятно. В месте, где оно расположено, в глаз входит зрительный нерв. В нем, как в жгуте, собраны все нервные волокна от каждой палочки и колбочки.

Слепое пятно обнаруживается в простом и интересном опыте. Посмотрите левым глазом на крест (рис. 7), а правый закройте. Боковым зрением вы увидите синий кружок слева. Если приближать рисунок к глазу, то на расстоянии 20—25 см синий кружок исчезнет из поля зрения — его изображение попадает на слепое пятно глаза.

Чувствительность человеческого глаза к свету очень высока. После длительного пребывания в темноте глаз приспосабливается к восприятию чрезвычайно малых световых потоков. Такое увеличение чувствительности глаза называют **темновой адаптацией.**

В опытах академика С. И. Вавилова было показано, что человек, глаза которого полностью привыкли к темноте, может чувствовать даже отдельные фотоны.

Глаз может воспринимать и большие световые потоки. Эти потоки превосходят наименьший световой поток, который еще ощущает глаз, в триллион раз. По широте охватываемого диапазона глаз можно сравнить с фантастическими весами, на которых можно было бы взвешивать тела с массой от десятитысячной грамма до сотен тонн: бациллу и железнодорожный вагон!

Наш орган зрения позволяет нам различать цвета, т. е. по-разному воспринимать излучение в зависимости от его состава.

При одной и той же мощности светового потока желто-зеленые лучи будут восприниматься глазом как самые яркие, а красные и фиолетовые покажутся самыми слабыми. Если яркость желто-зеленого света с длиной волны $\lambda = 0{,}555$ мкм принять за единицу, то яркость голубого света той же мощности будет равна 0,2, а яркость красного света — 0,1 от яркости желто-зеленого потока. Даже мощные потоки излучений с длиной волны короче 0,3 мкм и длиннее 0,9 мкм глаз не воспринимает.

Построим зависимость чувствительности глаза от длины волны попадающего в него света. По оси ординат отложим чувствительность глаза в относительных единицах, а по оси абсцисс — длину волны в нанометрах. Тогда получим кривую спектральной чувствительности глаза (рис. 7). Ее называют **кривой относительной видности,** максимум этой кривой, а значит и максимум чувствительности глаза, совпадает с максимумом излучательной способности Солнца.

Наши органы зрения приспособлены к солнечному свету. Но механизм зрения слишком сложен, и пока что нет полностью удовлетворительного объяснения, почему желтые лучи кажутся глазу ярче, чем красные и фиолетовые. Сложность заключается в том, что в зри-

тельном восприятии участвует головной мозг. В его клетках накапливаются и сохраняются жизненные картины, поэтому часто прошлые впечатления влияют на восприятие настоящего. Человек способен «видеть» и во сне или просто с закрытыми глазами, мысленно представлять те или иные картины.

Разные типы глаз. Глаз позвоночных животных похож на глаз человека. У беспозвоночных животных либо недоразвитые глаза, либо глаза, состоящие из отдельных несовершенных глазков — фасетов. Правда, есть одно замечательное исключение. Глаз наиболее развитого беспозвоночного — осьминога похож по своему строению на человеческий. В нем есть и роговица, и веко, и хрусталик, и сетчатка. Громадными глазами наделен спрут — их диаметр достигает 38 см.

Интересно устроены глаза насекомых. Лучше всего изучено зрение пчелы. Пчелиный глаз фасетчатый и состоит из множества отдельных глазков — аммотидий, расположенных тонким слоем на поверхности головы. Диаметр отдельного аммотидия примерно 30 мкм. Аммотидий, конечно, не может содержать фокусирующих кристаллов, и поэтому пчела плохо различает мелкие объекты; человеческий глаз способен видеть предметы в 30 раз меньшие, чем пчелиный. Зато пчела воспринимает невидимое для нас ультрафиолетовое излучение (до длины волны 0,3 мкм). Благодаря этому мир растений представляется пчелам гораздо богаче, чем нам. Многие цветы, кажущиеся нам белыми, по-разному отражают ультрафиолетовое излучение, и пчелы их видят цветными.

Пчела различает отдельные вспышки света с частотой до 200 раз в секунду. Для человека вспышки, следующие с частотой, меньшей в 10 раз, начинают сливаться и кажутся непрерывным потоком. Обладая быстрой пчелиной реакцией, в кино и на телевидении мы смогли бы различать, как на экран «наползают» отдельные

кадры. По-видимому, пчелам необходимо наблюдать более быстрые движения, чем нам. В улье насекомые с большой частотой машут крыльями, стремительно перемещаются, и человеческий глаз не успевает следить за этими движениями, а пчелиный глаз успевает.

Есть еще одна интересная особенность зрения «домашнего» насекомого. Пчела хорошо чувствует поляризацию света, и это помогает ей определять направление на Солнце.

Телескоп. Человеческое зрение несовершенно. Мы не в состоянии различать глазами ни те предметы, что находятся на очень больших расстояниях, ни те, что расположены слишком близко у глаз. Выручают оптические приборы, многократно увеличивающие силу нашего зрения. Так, телескоп открыл перед человеком космический мир.

Телескоп, а вернее зрительную трубу, изобрел датский оптик И. Липперсгей. Изобретение Липперсгея в то время имело военное значение и было засекречено датским правительством. И все же слухи об устройстве, приближающем далекие предметы, распространились по Европе. Узнал об этом и великий итальянский ученый Г. Галилей. Независимо от датского оптика ему удалось создать телескоп более совершенной конструкции. И объект наблюдения он выбрал самый интересный, направив телескоп в небо. Там он открыл спутники Юпитера, солнечные пятна, различил отдельные звезды Млечного Пути! Венера, как ясно было видно в телескоп, подобно Луне, проходила все фазы — от узенького серпа до полного круга. Наблюдая вращение спутников Юпитера, Галилей увидел то, что только угадывалось до него, — вращение Земли и планет вокруг Солнца. Как же устроен телескоп, в чем заключается принцип его работы?

Размеры изображения предмета на сетчатке глаза зависят от того, под каким углом мы видим предмет.

Если на закопченное стекло положить двухкопеечную монету и поместить его сантиметров на двадцать от глаза, то, рассматривая через стекло Солнце и двигая по стеклу монету, вы легко перекроете солнечный диск. Диаметр нашего светила равен 1 млн. 391 тыс. км, но Солнце удалено от Земли на 150 млн. км, и его изображение на сетчатке почти в десять раз меньше, чем изображение монетки, отстоящей от глаза на 20 см. В нашем случае солнечный диск виден под углом примерно в полградуса, а монетка — под углом в 10 раз бо́льшим. Угол, под которым мы видим предмет, — его называют **угловым диаметром** — образуют лучи, идущие от контура предмета к зрачку. Так, угловой диаметр Солнца 32′. Размер изображения Солнца на сетчатке глаза и определяется этим углом. Когда две крайние точки предмета видны под углом, меньшим 1′, то их изображения сливаются на сетчатой оболочке, и предмет представляется просто точкой. Говорят, что разрешающая способность глаза не превышает одной угловой минуты. Иными словами, о деталях предмета мы можем судить, если он виден под углом, бо́льшим одной угловой минуты.

Телескоп увеличивает угол зрения, под которым видны отдаленные предметы. Объектив телескопа дает изображение отдаленного предмета, которое рассматривается в окуляр. Если диаметр объектива телескопа равен D мм, то с его помощью можно различать объекты с угловыми размерами $\frac{140''}{D}$. Следовательно, чем больше диаметр телескопа, тем больше его способность различать детали далеких космических миров. Поэтому сооружают телескопы с очень большими объективами. Самый мощный телескоп с зеркалом диаметром 6 м создан в Советском Союзе.

Большой телескоп. Построить Большой телескоп — дело непростое. Только передовые страны мира могут

строить телескопы диаметром, исчисляемым метрами. До вступления в строй Большого советского телескопа наиболее мощный телескоп был у американцев. Диаметр его зеркала — 5 м, и собирает он в полтора раза меньше звездного света, чем наш шестиметровый гигант.

Главная часть телескопа — шестиметровое зеркало изготовлено из самой большой отливки, какую знало человечество за всю пятитысячелетнюю историю стеклоделия. Вес стеклянного диска, отлитого для зеркала, составил 70 т. Только на предварительную обработку гигантской заготовки ушло 15 тыс. карат алмазов. Отлитый стеклянный диск медленно, в течение двух лет, остывал по специально разработанному графику. Быстрое охлаждение привело бы к недопустимым механическим напряжениям в отливке, и она стала бы непригодной для изготовления объектива. Шестиметровая чаша телескопа была обработана с величайшей точностью и установлена на горе Пастухова на Северном Кавказе.

Выбор места для уникального инструмента не случаен. Наблюдать далекие слабые звезды можно лишь в условиях, когда влияние атмосферы на световой поток звезды сказывается незначительно. Специальная научная экспедиция установила, что гора Пастухова вполне удовлетворяет погодным требованиям и ее вершина может быть увенчана Большим телескопом.

Когда строительство замечательного астрономического инструмента было завершено, Генеральный секретарь ЦК КПСС Л. И. Брежнев поздравил ученых и строителей. «Создание уникального телескопа — крупное достижение отечественной науки и техники. Перед советскими учеными открылись возможности еще шире развернуть научный поиск, более глубоко проникнуть в тайны Вселенной, внести новый вклад в сокровищницу познаний человечества», — говорилось в поздравлении.

Рис. 8. Телескоп.



Какие же задачи помогает решить телескоп с самым большим объективом? С его помощью астрономы смогут наблюдать звезды, которые светят в 10 млн. раз слабее, чем самые тусклые звезды, еще видимые невооруженным глазом (рис. 8). Среди таких слабых звезд много объектов, раскрывающих загадки Вселенной. Изучая звезды в критические моменты их жизни, астрономы предскажут будущее нашего Солнца, поймут, что с ним будет происходить через миллиарды лет.

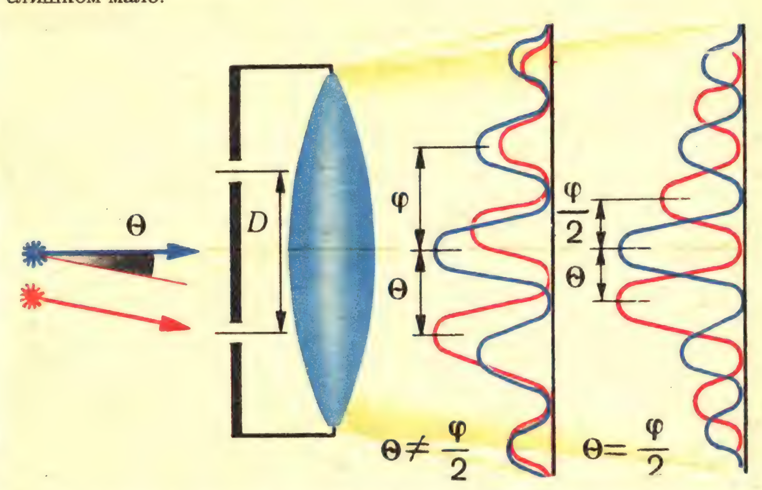
В космосе множество источников света, находящихся на границе, доступной для наблюдения, и требующих применения сверхмощного телескопа. Это и пульсары, и квазеры, и переменные галактики. Быть

может, с помощью Большого телескопа удастся исследовать процессы, происходящие в звездах на последнем этапе их жизни, когда звезда сжимается и становится сверхплотной «черной дырой».

Как измеряют диаметр звезд. Звезды красноватого цвета, такие, как звезда Бетельгейзе в созвездии Орион, по сравнению с другими звездами не отличались высокой температурой, о чем можно было судить по спектральному составу их излучения. Скорее наоборот, эти звезды можно считать холодными. Они принадлежат к классу звезд, поверхность которых нагрета всего до 3000°К. С уменьшением температуры энергия, излучаемая единицей поверхности нагретого тела, убывает пропорционально четвертой степени его абсолютной температуры. А это значит, что поток излучения единицы поверхности красной звезды в 16 раз меньше, чем поток излучения с такой же поверхности Солнца. И тем не менее Бетельгейзе давала очень много света. Проще всего интенсивный световой поток красных звезд объяснялся их огромными размерами. Расчеты показали, что в таком случае диаметр звезд должен быть очень большим, настолько большим, что возникал вопрос: а не объясняется ли их яркое свечение какой-то другой причиной, не связанной с их размерами?

Ответить на этот вопрос можно было, только измерив диаметр звезд. Но даже в самом сильном телескопе звезды кажутся точками, и определить их размеры не удается. И вот эту сложнейшую задачу американским ученым — физику А. Майкельсону и его помощникам — помогли решить две обыкновенные щели. Еще в середине XIX в. И. Физо предложил изящный метод, который, по его мнению, позволил бы измерить диаметр звезд. Идея Физо заключалась в следующем. Если перед линзой телескопа поставить две щели на расстоянии D, то в фокальной плоскости телескопа возникнет интерференционная картина от удаленного источника

Рис. 9. Определение диаметра звезды в опыте, предложенном Физо и осуществленном Стефаном. Расстояние D слишком мало.



света, находящегося перед щелями. Если теперь рассматривать через оборудованный щелями телескоп две очень близкие друг к другу звезды, то каждая из них образует свою систему интерференционных полос. Если телескоп направить так, что свет от одной из звезд пойдет параллельно оптической оси телескопа, то свет другой звезды будет составлять с оптической осью телескопа угол Θ, равный угловому расстоянию между звездами.

Сдвиг дифракционных картин относительно друг друга определится углом Θ (рис. 9). Центральный максимум и следующий за ним максимум дифракционной картины находятся на расстоянии, определяемом углом $\varphi = \frac{\lambda}{D}$. Если расстояние D подобрать так, что угол φ будет равен 2Θ, то максимум дифракционной

картины от первой звезды совпадет с минимумами дифракционной картины от второй и освещенность в фокальной плоскости линзы будет почти равномерной — полосы размажутся, и это произойдет в тот момент когда $\Theta = \frac{\varphi}{2}$. Таким образом, измерение угла Θ сведется к определению величины D, соответствующей моменту исчезновения дифракционных полос. Ведь когда дифракционная картина пропадает, $\Theta = \frac{\lambda}{2D}$.

Противоположные края звезды можно считать двумя источниками света, находящимися на угловом расстоянии, равном угловому диаметру звезды. Значит, наведя телескоп на край звезды, можно по дифракционной картине найти угловой ее диаметр, а умножив его на расстояние Земля — звезда, найти ее линейный диаметр.

Первая попытка осуществить предложенный Физо эксперимент принадлежит Стефану. Однако она оказалась безуспешной. Даже когда щели отодвигались на самые края самого большого телескопа, на котором мог работать Стефан, интерференционные полосы не исчезали. Величина D оказалась слишком малой, чтобы получить значение Θ, равное угловому диаметру звезды.

Через 50 лет проблемой измерения звездного диаметра заинтересовался Майкельсон. Он догадался, как и на малом телескопе можно получить большое расстояние D.

На телескопе с диаметром объектива 2,5 м Майкельсон положил перекладину с зеркалами, расположенными так, как это представлено на рисунке 10. Теперь эффективным расстоянием стал отрезок AB, значительно превосходящий диаметр объектива телескопа. Телескоп, снабженный таким сооружением, был направлен на Бетельгейзе. Сначала были видны интерференционные полосы, но, когда зеркала раздвинули, полосы исчезли. Они могли исчезнуть и в том случае,

Рис. 10. Определение диаметра звезды установкой Майкельсона. С помощью зеркал 1, 2, 3, 4 он увеличил расстояние *D*. Большая величина *D* позволила достичь равенства $\Theta = \frac{\lambda}{2D}$

если бы во время передвижения зеркал одно из них слегка повернулось на перекладине. Чтобы исключить ошибку, которая могла бы произойти из-за случайного изменения положения зеркала, Майкельсон, когда исчезли интерференционные полосы, направил все устройство на другую звезду — полосы появились вновь. Это означало, что зеркала при их раздвижении не испытали никаких поворотов. В противном случае полосы не возникли бы и при рассматривании новой звезды. Система работала надежно. Опыты завершились замечательным успехом — с помощью телескопа, оборудованного нехитрым приспособлением из щелей и зеркал, был определен размер звезды. Диаметр Бетельгейзе оказался равным 390 млн. км. Если бы эта звезда заняла место Солнца, то земная орбита проходила бы внутри звездного тела.

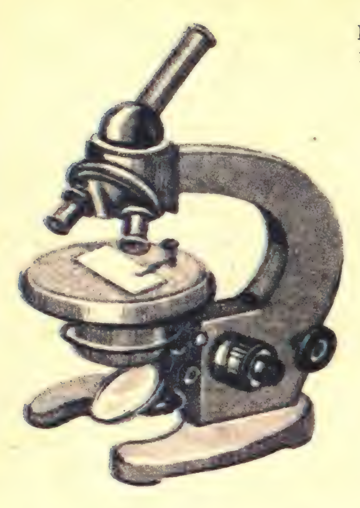


Рис. 11. Оптический микроскоп.

Микроскоп. Чтобы рассмотреть малый предмет, нужно поднести его к глазу на близкое расстояние, тогда его угловой диаметр увеличится и детали предмета станут различимы. Но глазной хрусталик отчетливо изображает предмет, если он находится не ближе 10 см от глаза. При меньших расстояниях создаваемая мышцами максимальная кривизна хрусталика оказывается недостаточной, чтобы получить четкое изображение на сетчатке. Поэтому очень малые предметы приходится рассматривать через лупу или микроскоп — приборы, увеличивающие угол, под которым виден близкий предмет (рис. 11).

«Зверюшки» Левенгука. Хотя схему сложного двухступенчатого микроскопа предложил в 1610 г. Галилей, по ряду причин исследования очень малых объектов начались значительно позже.

В 1673 г. в Лондонское королевское общество (так называют Английскую академию наук) пришло письмо

из Голландии. В нем торговец сукнами Антони Левенгук описывал удивительные наблюдения. С помощью своего микроскопа Левенгук открыл не видимый простым глазом и до него совершенно неизвестный мир живых существ.

«С величайшим изумлением я увидел в капле множество великое зверюшек, оживленно двигающихся во всех направлениях, как щука в воде, самое мелкое из них в тысячу раз менее глаза взрослой блохи», — писал голландец. Несколько лет в Англии никто не мог проверить опытов Левенгука. Наконец прославленный ученый Р. Гук увидел «зверюшек» Левенгука в настое перца, затратив на это немалый труд. Однако торговец сукнами различал более мелкие объекты, чем прославленный ученый. По крайней мере это следовало из описаний опытов, направленных им в Королевское общество.

«Микроскоп» Левенгука. Какой же силы был прибор у голландца, как он построен, если превосходит микроскоп Гука, основанный, как казалось, на самых совершенных оптических принципах?

На заседании Королевского общества в 1681 г. было решено просить необычного корреспондента раскрыть секрет устройства его прибора и способов наблюдения. Но Левенгук продолжал сообщать о все новых и новых удивительных наблюдениях, не говоря ни слова о своих приборах. Королевскому обществу пришлось командировать в Голландию представителя с заданием купить у Левенгука микроскоп. Командированный ученый убедился, что все микроскопы голландца — простые лупы! Необычность их состояла в чрезвычайно малых размерах — они не превосходили булавочной головки.

Известно, что чем меньше радиус кривизны лупы, а значит и ее размеры, тем сильнее увеличение. Самые лучшие лупы Левенгука увеличивали в 270 раз. Такое увеличение и открыло перед ним неизведанный микро-

скопический мир. Левенгук увидел кровеносные тельца, движение крови в капиллярных сосудах головастика, строение мускульных тканей, бактерии и многое другое, о чем он рассказал в своем труде «Тайны природы, открытые Антони Левенгуком».

На пути к современному микроскопу. До начала XIX в. сложные микроскопы, построенные по схеме, предложенной Галилеем, не могли конкурировать с очень хорошими лупами. Лишь в 1824 г. были разработаны объективы из многих линз. Такие объективы, установленные в сложном микроскопе, позволили достигнуть увеличений до 500 и даже 1000 раз, оставив далеко позади лупы Левенгука. В 70-х годах прошлого века немецкий ученый Э. Аббе разработал теорию современного оптического микроскопа. На основе этой теории рассчитывают оптические системы микроскопов.

Увеличение оптических микроскопов обычно не превосходит 2000. Для многих научных и технических задач этого недостаточно. Если за микроскопом, увеличивающим в 2000 раз, поставить такой же другой и рассматривать предметы с увеличением, равным $2000 \times 2000 = 4$ млн. раз, то и при миллионном увеличении мы новых подробностей не увидим! Наоборот, изображение предмета будет размазано. Посмотрите в сильную лупу на газетную фотографию. Новых деталей изображения вы не увидите, а картина превратится в набор светлых и темных точек. Большое увеличение не помогает.

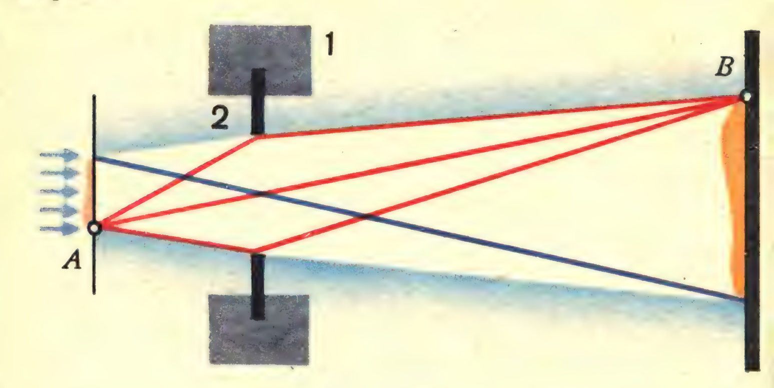
Так же и в микроскопе, излишнее увеличение не поможет рассмотреть предмет, размеры которого меньше длины световой волны. Такие предметы свет огибает по законам дифракции. Минимальные размеры предмета d, различимого через микроскоп, определяются формулой $d = \frac{0,61\lambda}{A}$. Постоянная A в этой формуле приблизительно равна единице. Для зеленого света величина d равна 0,3 мкм. Чтобы такой предмет

был виден под углом 1′, увеличение микроскопа должно быть около 1000.

Можно освещать предмет коротковолновым невидимым излучением, а потом с помощью экранов, светящихся под действием такого излучения, получать уже видимое изображение. Однако на этом пути большого выигрыша получить нельзя. Дело в том, что нет материалов, из которых можно сделать линзы коротковолнового микроскопа. Лучшие материалы — кварц и флюорит. Но и кварц поглощает излучение, если его длина волны менее 0,18 мкм, а «рекордсмен» флюорит прозрачен лишь до 0,12 мкм. Эта длина волны в три раза меньше граничной волны видимого излучения. Для коротковолновых ультрафиолетовых лучей все вещества непрозрачны. Зеркальный микроскоп, в котором вместо линз устанавливают зеркала, может работать и в области очень коротких длин волн ультрафиолетового излучения, но это сложный прибор. К тому же коротковолновое ультрафиолетовое излучение сильно поглощается воздухом, и микроскоп приходится помещать в вакуум. Однако существует совершенно иной путь.

Электронный микроскоп. Изображение предмета можно создать не только светом, но и потоком заряженных частиц. Для этой цели лучше всего подходят электроны. Когда приходится иметь дело с такими малыми объектами, как вирусы, применяют электронный микроскоп. На тонкую коллодиевую пленку толщиной 0,01 мкм наносят каплю воды с вирусами. Затем пленка высушивается и закладывается на предметный столик электронного микроскопа. Из специального источника электронов — электронной пушки — на пленку падает параллельный пучок электронов (рис. 12). Тело вируса неоднородно, и разные его части рассеивают электроны по-разному. Плотные части вируса рассеивают электроны сильнее, поэтому от них меньшая доля

Рис. 12. Схема электронного микроскопа.



электронов проходит через отверстие *2* — аппертурную диафрагму микроскопа. Электронная линза 1 собирает в точке *B* электроны, вышедшие из точки *A* расходящимся пучком, и так, по точкам, линза дает изображение предмета на светящемся под действием электронов экране. В местах изображения более плотных частей вируса электронный ток окажется небольшим. На экране эти места будут темными, а места, соответствующие менее плотным частям, будут светлее.

Мы рассмотрели только главную часть электронного микроскопа. На самом деле в нем после первой линзы нет никакого экрана, а полученное в плоскости изображение служит, так же как и в оптическом микроскопе, объектом для второй линзы, которая и дает электронное изображение на экране, светящемся под действием электронов. Экран экспериментатор рассматривает в лупу.

Электронный микроскоп делает доступными для изучения более мелкие детали, чем оптический, потому что у него значительно выше разрешающая способность.

Чтобы понять, почему в электронном микроскопе дифракция играет меньшую роль, нужно обратиться к открытию известного французского ученого Луи де Бройля.

Еще в 20-х годах нашего столетия де Бройль высказал смелую мысль: связь между количеством движения светового кванта — фотона и его длиной волны справедлива и для других частиц, т. е. $\lambda=\frac{h}{p}$. Опытным путем это положение было подтверждено. Движущийся со скоростью v электрон действительно ведет себя как волна, длина которой $\lambda = \frac{h}{mv}$, где h — постоянная Планка, m — масса электрона.

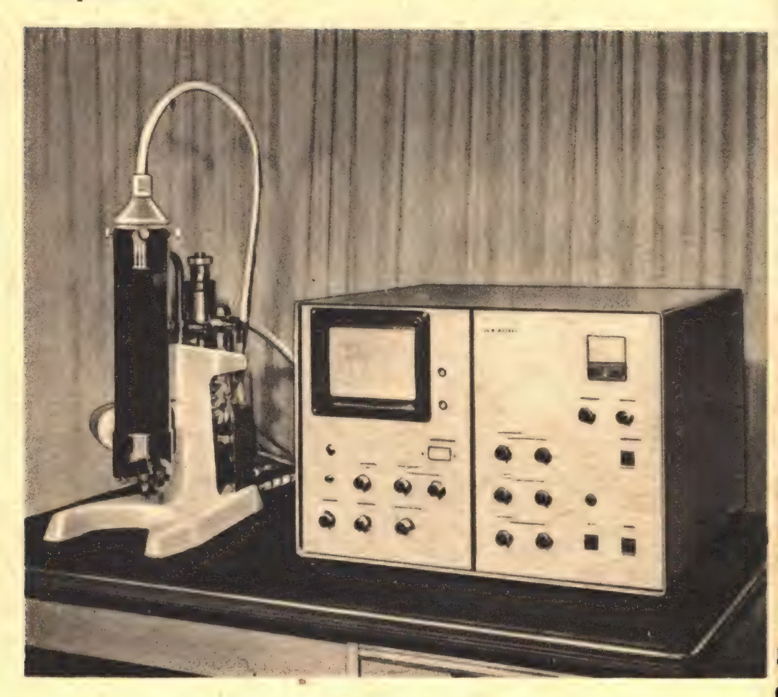
Обычно электроны разгоняются в микроскопах, пройдя разность потенциала около 15 000 В. После этого их скорость достигает 72 000 км/с, а длина волны — 0,01 нм. Получается, что длина волны таких электронов в 50 000 раз короче световой волны зеленого света. В таком случае дифракция должна сказываться, когда рассматриваемый предмет сравним с длиной волны электрона.

Электронный микроскоп дает возможность рассматривать предметы в несколько десятков долей нанометра — в сотни раз более мелкие, чем оптический микроскоп. Наименьшие размеры предмета, еще различаемого с помощью электронного микроскопа, ограничиваются не дифракцией электронов, а качеством электронных пушек — источников электронов, обеспечивающих работу микроскопа.

Растровый микроскоп. Самые современные электронные микроскопы — растровые. В таком микроскопе тончайший электронный луч последовательно, одну за другой, ощупывает точки предмета (рис. 13).

Допустим, под лучом микроскопа лесной житель — муравей и увеличение невелико. Тогда на экране микроскопа, а он такой же, как и у обыкновенного телевизора,

Рис. 13. Растровый микроскоп.



муравей поместится целиком. Поворот переключателя — и весь экран заполняет муравьиная лапка. Еще одно переключение — и четко видны мельчайшие детали ее строения, микроскопические щетинки, которыми покрыта муравьиная «кожа» — хитиновый покров.

Увеличение микроскопа меняется ступенями — от 10 крат до 100 000 простым поворотом переключателя, подобного переключателю телевизионных программ.

Если бы мы захотели увидеть муравья полностью при максимальном увеличении, то для этого потребовался бы экран размером с футбольное поле!

Как же работает растровый микроскоп, чем определяется предел его увеличения? Почему он равен ста тысячам, а, скажем, не миллиону?

Как уже говорилось, на наблюдаемый предмет падает тонкий электронный луч. Площадка, «освещенная» электронами, испускает свои вторичные электроны. Электрическое поле переносит вторичные электроны к специальному кристаллу. Под действием электронов кристалл светится. За кристаллом установлен фотоумножитель, преобразующий свет в электрический ток, который и управляет яркостью электронного луча кинескопа.

Каждая точка предмета по-своему испускает вторичные электроны. Точки на «возвышенностях» предмета излучают больше электронов, чем точки в «низинах». Чем больше вторичных электронов покинуло ту или иную площадку, тем ярче соответствующая его точка на экране телевизора. По этим точкам электронный луч кинескопа «рисует» увеличенное изображение на экране. Изображение получается как бы набранным из «точек». Оно в принципе такое же, как и растр газетной фотографии, только вместо черных и белых точек — электронные пятна разной яркости. Отсюда и название — растровый микроскоп.

Каждому пятну на экране соответствует кружок на предмете, равный сечению электронного луча. Получается, что размеры наименьшей детали, которую можно еще рассмотреть в растровый микроскоп, должны быть не меньше диаметра электронного луча, обегающего предмет.

У самого тонкого пучка, который можно сформировать из потока частиц, диаметр не может быть меньше их длины волны, вычисляемой по формуле Луи де Бройля. Так, диаметр самого узкого пучка растрового опти-

ческого микроскопа, если бы появилась нужда построить такой микроскоп, был бы равен 0,3 мкм. В электронном микроскопе самый малый диаметр пучка всего 0,3 нм — в 100 раз меньше длины световой волны. В принципе пучок мог быть еще «острее» — длина волны быстрых электронов значительно меньше 0,3 нм. Но в более узком пучке, даже если применяются самые мощные современные источники электронов, электронный поток становится слишком малым, чтобы создать изображение.

Итак, наименьший элемент, еще различимый с помощью растрового электронного микроскопа, в 100 раз меньше по сравнению с наблюдаемым в оптическом микроскопе. Примерно во столько же раз больше и увеличение растрового микроскопа, которое достигает 100 000 крат.

В конечном итоге минимальные детали предмета, доступные для изучения с помощью микроскопа, могут быть одинаковы с длиной волны потока микрочастиц, используемых в микроскопе.

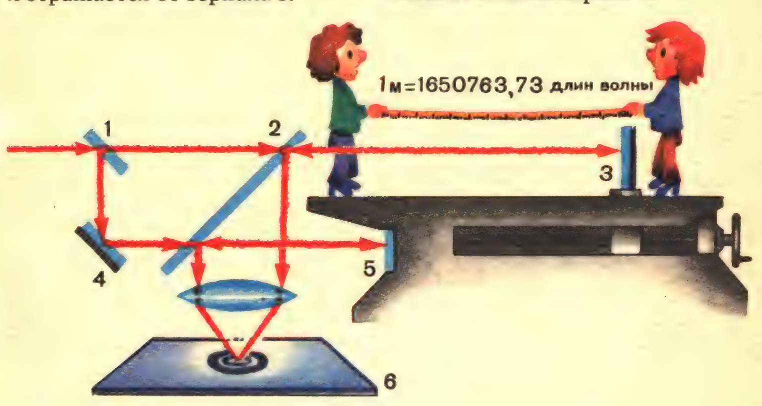
Величиной, сравнимой с длиной волны фотона, как правило, определяется наивысшая точность измерения геометрических размеров тел. Поэтому, в частности, оказалось удобным эталон метра выразить в длинах световой волны.

Эталон длины. Сегодня за эталон метра принята длина, на которой укладываются 1 650 763,73 длин волны света, излучаемого криптоном с массовым числом 86 при переходе атома криптона из состояния $2p_{10}$ в состояние $5d_5$. При этом возникает излучение в оранжевой области спектра с длиной волны $\lambda = 6057{,}8021 \cdot 10^{-10}$ м.

Каким образом удается измерить столь малую величину, как световая волна, с точностью до восьмого знака и сравнить ее с металлическим эталоном метра?

Хорошую точность обеспечивают дифракционные решетки. Из приведенной для решетки формулы

Рис. 14. Схема измерения длины метра с помощью световых волн. Полупрозрачное зеркало 1 делит световой пучок. Часть лучей проходит через полупрозрачное зеркало 2 и отражается от зеркала 3. Другая часть лучей, отражаясь от зеркала 4, проходит через зеркало 2 и отражается от зеркала 5. Лучи, отраженные от зеркал 3 и 5, отразятся и от зеркала 2 и совместятся на экране 6.



(см. стр. 51) следует, что $\lambda = \frac{D \sin \varphi}{m}$. Достаточно измерить угол φ, чтобы определить длину волны, так как остальные величины, входящие в формулу, известны. Очень точные измерения длины волны получаются с помощью интерферометров — приборов, в которых складываются световые волны, сдвинутые по фазе. Анализ получающейся при этом картины, состоящей из светлых и темных концентрических полос, позволяет нам определить длину световой волны с очень высокой точностью.

Интерферометры дают возможность сравнить материальный эталон метра, например расстояние между штрихами, нанесенными на платиново-иридиевый стержень, с длиной волны светового излучения. При этом измерения производятся со значительно большей точностью, чем ширина градуировочных штрихов на

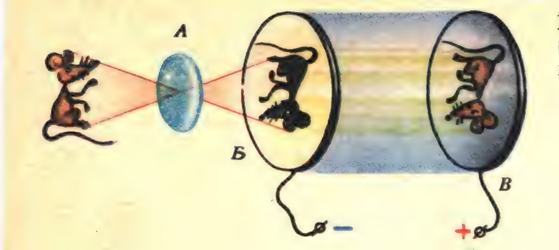


Рис. 15. Электронно-оптический преобразователь

металлическом стержне-эталоне. Поэтому металлический эталон метра оказывался менее точным, чем световой.

Более того, длина световой волны — величина постоянная, а металлические эталоны, изготовленные даже из самых лучших металлов, в результате изменений, происходящих со временем в их кристаллической решетке, деформируются.

Невидимое становится видимым. Глазом можно увидеть и инфракрасное излучение с помощью специального устройства — электронно-оптического преобразователя (рис. 15).

Объектив *А* переносит изображение «светящегося» в темноте тела на катод *Б*, покрытый прозрачным полупроводниковым слоем. Падая на этот слой, кванты инфракрасного излучения выбивают из него электроны. Между катодом и экраном *В* (анодом) поддерживается электрическое напряжение; под его действием электроны двигаются, ускоряясь, к экрану и переносят на него инфракрасное изображение. Экран испускает уже видимое излучение.

Можно и по-другому преобразовать инфракрасное изображение в видимое. Для этого на экран передающей телевизионной трубки наносится вместо слоя, реагирующего на видимый свет, полупроводниковый слой, чувствительный к инфракрасному излучению.

Электронный луч передает инфракрасное изображение с такого экрана через усилительную радиосхему на приемную трубку — кинескоп, такую же, как и в обычном телевизоре.

Обе эти системы позволяют преобразовать изображения очень слабо нагретых тел в видимые. В электронно-оптическом преобразователе фотоны должны обладать энергией достаточной, чтобы выбивать электроны из чувствительного слоя. В телевизионном преобразователе, там, куда попадает излучение, должно измениться сопротивление слоя. Для этого энергия фотона может быть меньшей, и, следовательно, удастся обнаружить излучение с более длинной волной.

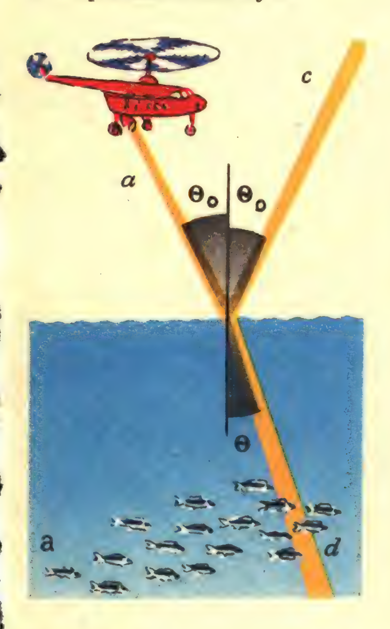
Преломление света. Еще в 140 г. до нашей эры греческий ученый Клавдий Птолемей составил таблицу углов Θ отклонения света в воде для разных углов падения светового луча из воздуха (рис. 16а). Какими соотношениями связаны эти углы между собой? В древности этот вопрос поставил в тупик многих, а ответ был найден лишь в 1621 г. голландским математиком В. Снеллом: $n = \frac{\sin \Theta_0}{\sin \Theta}$. В этой формуле, пригодной, кстати, и для звуковой волны, величина n, показатель преломления, равна отношению скорости света v_I в среде I к скорости света v_{II} в среде II.

Почему же отношение скоростей $\frac{v_I}{v_{II}}$ назвали показателем преломления света? Разве можно сломать луч? Оказывается, можно. Опустим в стакан с водой ложку. На границе раздела между водой и воздухом ложка нам покажется сломанной (рис.16б). Мы знаем, что на ложке нет никаких повреждений. Преломлялись лишь световые лучи на границе раздела воздух — вода, и преломлялись потому, что скорость света в воде в 1,33 раза меньше, чем в воздухе.

Законы распространения света в веществе во всей полноте были изучены на основе работ замечательного английского ученого Д. Максвелла. Максвелл вывел систему уравнений, описывающих поведение колеблющихся электрических и магнитных полей. Оказалось, что скорость распространения электромагнитных волн равна скорости света и не зависит от длины волны, когда волны распространяются в вакууме. Максвелл пришел к заключению, что природа электромагнитных и световых волн одна и та же. В дальнейшем многими опытами вывод Максвелла был подтвержден. На рисунке 17а показана структура электромагнитной волны или светового луча. В плоскостях *M* и *T* коле-

Рис. 16 а. Преломление света. Θ_0 — угол падения (равен углу отражения), Θ — угол преломления; *a* — падающий луч, *c* — отраженный луч, *d* — преломленный луч.

Рис. 16 б. На границе раздела между водой и воздухом ложка кажется сломанной.





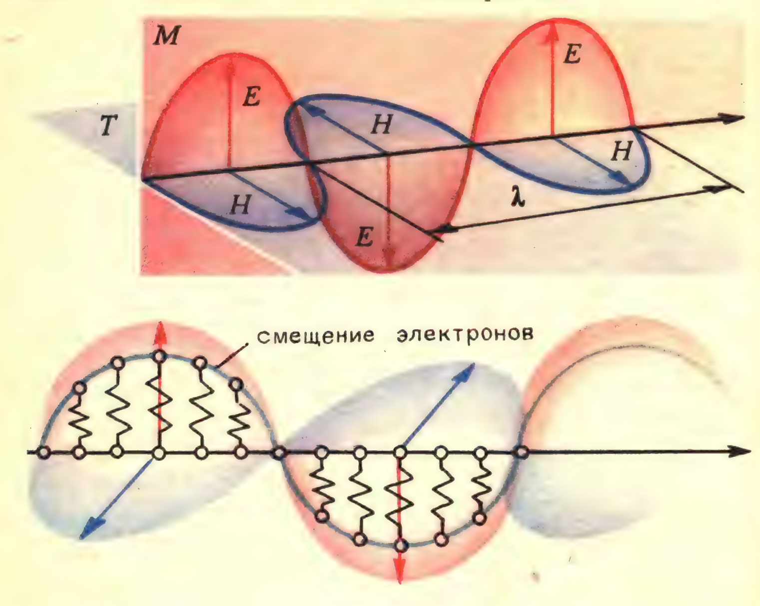
блются электрическое и магнитное поля *E* и *H*. При этом плоскости *M* и *T* перпендикулярны друг другу.

Если внимательно посмотреть на рисунок 18, то нетрудно сообразить, что частота колебаний ν равна скорости света, деленной на длину волны: $\nu = \frac{c}{\lambda}$. Только за одну секунду электрическое и магнитное поля в зеленом световом луче совершают 600 биллионов колебаний!

Когда световой луч входит в прозрачное вещество, его электрическое поле, меняющееся очень быстро, не

Рис. 17а. Структура световой волны

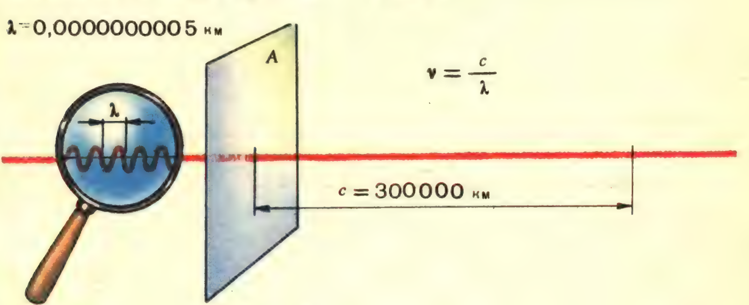
Рис. 17 б. Смещение электронов.



успевает передать колебания тяжелым атомным ядрам и прочно связанным с ними электронам внутренних атомных оболочек. Внешние же электроны, слабо удерживаемые в атоме, легко смещаются под действием электрического поля световой волны, повторяя ее «рисунок» (рис. 17б).

Такие электроны ведут себя так, словно они прикреплены к атомным ядрам на пружинках. Смещенные со своих мест световым электрическим полем, они начинают колебаться и испускать свет той же длины волны и того же направления, что и падающее излучение. Первичная волна и волна, рожденная колебаниями элек-

Рис. 18. Частота колебаний равна числу длин волн, прошедших за единицу времени через плоскость A. За секунду волна распространяется на расстояние c и через плоскость A пройдет цуг волн длиной c. Наблюдатель в плоскости A $\frac{c}{\lambda}$ раз зарегистрирует изменение направления колебаний электрического и магнитного полей.



тронов, складываются. Скорость результирующей волны оказывается меньше скорости света в вакууме. Свет от атома к атому идет с предельной скоростью c, но время тратится на взаимодействие с электронами. Получается, что в прозрачном веществе свет распространяется медленнее, чем в вакууме.

Физики вычислили, что отношение скорости света в вакууме c к его скорости в прозрачном веществе v равно $1+\frac{A}{a^2-\nu^2}$. В этой формуле a и A — постоянные величины, характеризующие данное вещество, а ν — частота колебаний световых волн. Постоянная a для воздуха стекла, кварца, флюорита и других прозрачных веществ больше частоты световых колебаний, и, следовательно, второй член в приведенной формуле положителен, а отношение c к v больше единицы, а это означает, что свет в веществе распространяется медленнее, чем в вакууме. Отношение скорости света c к скорости v — показатель преломления вещества: $n=1+\frac{A}{a^2-\nu^2}$.



Рис. 19. Спектр.

Посмотрите внимательно на эту формулу. Показатель преломления растет с увеличением частоты колебаний: чем больше ν, тем меньше $a^2-\nu^2$, а следовательно, больше величина n.

Тайны стеклянной призмы. Показатель преломления вещества растет с увеличением частоты колебаний световой волны. Поэтому если луч белого цвета, в котором «смешаны» световые волны с разной частотой колебаний, пропустить сквозь стеклянную призму, то световые лучи с большей частотой колебаний отклонятся от первоначального направления на больший угол, чем лучи с меньшей частотой колебаний. В результате белый луч разложится на цветные.

Ньютон первый доказал, что дневной свет состоит из цветных лучей. Пропустив солнечный свет через призму, он получил цветную полосу — **спектр** (рис. 19). До Ньютона белый свет считали самым простым, хотя спектр получали и раньше. Появление цветной полосы — спектра — объясняли воздействием вещества призмы на белый свет.

Выделяя диафрагмой цветные лучи и направляя их на призму, Ньютон убедился, что они не разлагаются на составляющие. Такие лучи Ньютон назвал **монохроматическими** (в переводе с греческого — «одноцветные»).

В монохроматическом излучении световая волна колеблется с какой-то определенной частотой. И тогда Ньютон, чтобы окончательно доказать, что белый свет сложный, получил его смешением монохроматических лучей.

Работы Ньютона стали важнейшим шагом в исследованиях состава света. Дальнейшее существенное продвижение в этом направлении связано с именами немецких ученых Р. Бунзена и Г. Кирхгофа.

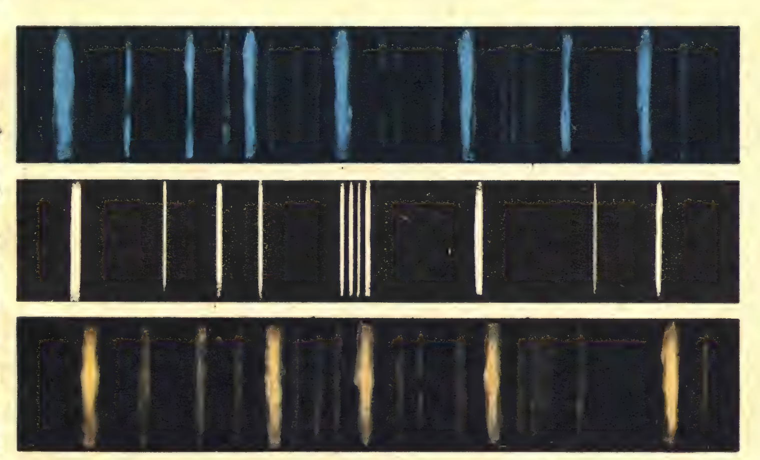
Бунзеновская горелка. Однажды немецкий химик Р. Бунзен заметил, что в пламени изобретенной им

очень жаркой горелки многие вещества превращаются в пар и окрашивают пламя в характерный для них цвет. Так, медь давала зеленое пламя, поваренная соль — желтое, а стронций — малиново-красное. Казалось, что стоит только поместить в горелку вещество, и сразу же без долгих химических процедур по цвету пламени удастся определить его состав. Однако в действительности задача не была такой простой. Вскоре Бунзен убедился, что различные вещества могут давать пламя, цвет которого нашему глазу кажется одинаковым. Он уже подумывал бросить свою затею, когда неожиданный выход из положения ему указал профессор физики Г. Кирхгоф.

По совету Кирхгофа свет окрашенного пламени горелки был пропущен через призму. Оказалось, что спектр каждого химического элемента отличался от всех других. Например, распознать глазом, каким из двух элементов — литием или стронцием — окрашено пламя, невозможно: пламя всегда одного — малиново-красного цвета. Если же свет «литиевого» пламени пропустить через призму, то получается яркая линия и рядом с нею слабая оранжевая. Стронций же дает голубую, две красные, оранжевую и желтую линии. Так был открыт **метод спектрального анализа** химических элементов. Ученые расшифровали язык света, и свет начал рассказывать им о составе испускающего излучение вещества.

Солнечный элемент. Бунзен и Кирхгоф открыли оптические методы анализа в 1859 г., а спустя девять лет французский астроном Ж. Жансен и английский астроном Н. Локьер независимо друг от друга обнаружили на Солнце неизвестный тогда элемент, названный гелием (от греческого «гелиос» — «Солнце»). Элемент был открыт по анализу солнечного спектра. Это представлялось настоящим чудом. С помощью спектроскопа удалось изучить вещество, находящееся на расстоянии

Рис. 20. Вверху — спектр удаляющегося источника света. Внизу — спектр приближающегося источника света. В середине — эталонный спектр неподвижного источника света.



150 млн. км от нашей планеты. Лишь через 27 лет гелий был найден английским ученым У. Рамзаем в земном минерале клевеите.

Расширяющаяся Вселенная. Не менее удивительны другие возможности спектроскопа. С его помощью, например, можно измерять скорость движения светящихся тел. Оказывается, спектр источника света сдвигается в область длинных волн, если источник удаляется от наблюдателя, и, наоборот, в область коротких волн, если источник движется к наблюдателю (**эффект Доплера**). По этому сдвигу нетрудно определить скорость излучающего тела. Именно таким путем ученые-астрономы измерили скорости удаляющихся от Солнечной системы галактик.

В 1912 г. американский астроном В. М. Слайфер начал изучать спектры далеких галактик. На них он и

направил телескоп. Собранный телескопом свет поступал на спектроскоп и прибор, анализирующий спектры. К удивлению Слайфера, спектральные линии знакомых элементов оказались не совсем там, где им полагалось быть, — они сместились к красному концу спектра, т. е. в сторону длинных волн. На первый взгляд факт казался совершенно непонятным.

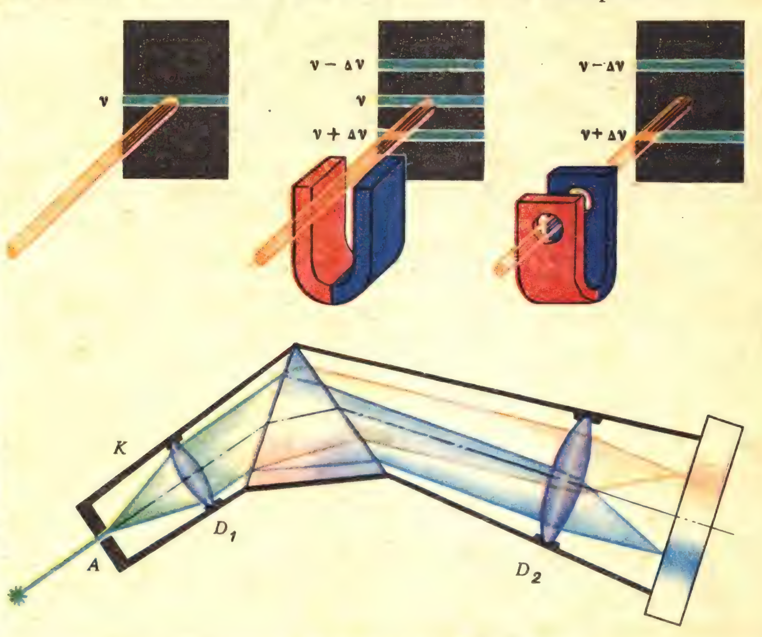
Однако его можно было объяснить, предположив, что галактики удаляются от нас с очень большой скоростью (рис. 20). По смещению спектральных линий Э. Хаббл и М. Хьюмасон в 1929 г. вычислили, что скорость V удаления галактики от Солнечной системы пропорциональна расстоянию r — «Солнце — галактика»: $v = \frac{r}{3 \cdot 10^{17}}$. Оказалось, что почти все галактики разлетаются от нас и некоторые движутся со скоростью, близкой к половине скорости света! Такое расширение Вселенной еще в 1922 г. предсказал советский ученый А. А. Фридман.

Магнитные острова. Спектроскоп дает возможность измерять и магнитные поля. В 1896 г. голландский ученый П. Зееман наблюдал влияние магнитного поля на спектры раскаленных газов. Оказалось, что в сильном магнитном поле, если наблюдение вести поперек магнитного поля, у зелено-голубой линии кадмия появляются дополнительные линии-спутники с частотами $\nu - \Delta\nu$ и $\nu + \Delta\nu$. В случае наблюдения вдоль магнитного поля вместо линии с частотой ν появляются две линии с частотами $\nu + \Delta\nu$ и $\nu - \Delta\nu$. Поэтому по спектру можно судить не только о величине, но и о направлении магнитного поля, в котором находится светящееся вещество (рис. 21).

Когда Галилей наблюдал пятна на Солнце, он не смог объяснить их природу. Измеряя спектры солнечных пятен, американский ученый Д. Хейл в 1908 г. установил, что солнечные пятна — громадные магнитные

Рис. 21. Атомы, помещенные в сильное магнитное поле, излучают в направлении, перпендикулярном магнитному полю, свет с основной частотой ν и «боковыми» частотами ν + Δν и ν − Δν. В направлении вдоль магнитного поля излучение с частотой ν отсутствует. Остаются только линии с частотами ν + Δν и ν − Δν.

Рис. 22. Схема спектроскопа.



острова. Он убедился, что спектр излучения солнечного пятна такой же, как и спектр раскаленных газов, помещенных в магнитное поле.

Спектроскоп. Как же устроен спектроскоп — прибор, давший возможность сделать замечательные открытия?

Главная деталь спектроскопа — призма. Световой луч, попадая на ее плоскую грань под углом Θ, входит в

призму и преломляется по известным законам. Если, например, на призму падает свет, содержащий голубое и желтое монохроматические излучения, то свет нам будет казаться зеленым. Смесь голубого и желтого света мы воспринимаем как зеленый цвет, и эту смесь глаз не отличит от истинного зеленого света. Спектроскоп легко обнаружит, что луч смешанный, а не зеленый.

Это станет ясно, если рассмотреть оптическую схему спектроскопа, показанную на рисунке 22. Трубка *K* называется **коллиматором.** Перед щелью *A* коллиматора устанавливают источник света, спектр которого изучают. Эта щель помещена в фокальной плоскости двояковыпуклой линзы D_1. Линза D_1 из выходящего из щели *A* света формирует параллельный пучок. После призмы этот пучок расщепляется на два параллельных пучка, между осями которых и оптической осью линзы D_2 образуются разные углы. Поэтому в фокальной плоскости линзы D_2 появляются две линии — желтого и голубого цвета — изображения щели *A*. Щель *A* обычно очень узка, и поэтому ее изображения в разных цветах называют **линиями спектра.**

Сравнительно недавно с помощью спектроскопа в излучении некоторых звезд был обнаружен спектр технеция — элемента, атомы которого быстро распадаются и могут присутствовать в звездном веществе только тогда, когда идет процесс рождения атомов. На основании этих данных ученые пришли к выводу, что в далеких мирах еще идут процессы образования тяжелых элементов.

В современных спектральных приборах часто вместо призмы применяют дифракционную решетку. Разница в углах отклонения у света разной длины волны больше у дифракционной решетки, чем у призмы, и с ее помощью получают весьма тонкие детали оптических спектров. Первая решетка была изготовлена И. Фраунгофером. С ее помощью Фраунгоферу удалось

открыть в солнечном излучении узкие темные линии, которые позднее по имени их открывателя были названы фраунгоферовыми. Линии эти появляются в результате поглощения света парами элементов солнечной «атмосферы».

Решетка Фраунгофера представляла собой стеклянную пластинку с нанесенными на нее параллельными штрихами. Чем чаще штрихи на решетке, тем больше разрешающая способность спектроскопа. Существуют решетки, у которых на 1 мм нанесено более 1000 штрихов. Чтобы нанести такие тонкие штрихи на пластинку, построены специальные машины. Бывают и отражательные решетки, когда штрихи нанесены на зеркальную поверхность металла. Решетка рассеивает падающий на нее свет. При этом свет определенной длины волны рассеивается под углами, которые определяются расстоянием D между штрихами решетки: $D\sin\varphi = m\lambda$. В этой формуле φ — угол отклонения луча с длиной волны λ, m — целое число. Чем меньше расстояние между штрихами, тем больше разница между углами, на которые отклоняются световые лучи с разной длиной волны. Когда $m = 0$, угол отклонения одинаков для всех лучей независимо от длины волны и равен нулю. Поэтому в направлении $\varphi = 0$ получается белая полоска — смесь излучений с разными длинами волн. Зато начиная с $m = 1$ на экране, расположенном в фокальной плоскости линзы, чередуются темные и цветные полосы.

Спектры химических элементов. Посмотрим теперь, как обнаруживают химический элемент с помощью спектроскопа. Введем в почти бесцветное пламя бунзеновской горелки платиновую проволочку, смоченную раствором поваренной соли. Если пламя горелки находится у щели коллиматора A, то в окуляре появятся две очень близко расположенные желтые линии. Такие же линии будут видны, если в пламя горелки помещать другие соединения натрия, но они никогда не возникают, если в

Рис. 23. Эффект Доплера.

соединении натрия нет. Поэтому естественно сделать вывод, что желтые линии принадлежат натрию.

Оказывается, светящиеся пары любого химического элемента излучают только одному ему присущий спектр — набор монохроматических излучений. Каждое монохроматическое излучение дает в спектре цветную линию. Такой состоящий из отдельных линий спектр называют **линейчатым.** Спектральные линии всех элементов собраны в таблице. В них указаны длины волн спектров элементов, последовательность и интенсивность спектральных линий. С помощью таких таблиц по спектрам можно быстро определить содержание даже очень малых количеств данного элемента в том или ином веществе.

Если вы подержали в руках платиновую проволочку, а затем поместили ее в пламя горелки перед щелью спектроскопа, то сразу же появятся линии натрия. Оказывается, следы поваренной соли, всегда присутствующие на ваших руках, попали на проволочку, и этих незначительных следов соли оказалось достаточно, чтобы спектроскоп обнаружил присутствие натрия. Натрий и калий обнаруживаются в неизвестной смеси веществ даже тогда, когда их содержание не превышает одной миллиардной доли.

Эффект Доплера. Тон гудка локомотива повышается, если поезд приближается к наблюдателю, и спадает при удалении. То же самое происходит со светом. Для наблюдателя частота света также меняется, когда относительно него меняется скорость источника света. Если водитель фотонной ракеты забыл бы снизить скорость на космическом перекрестке, то красный свет светофора для него оказался зеленым. Словом, водитель нарушил бы космические правила движения.

Если наблюдатель движется навстречу световой волне со скоростью v, то частота световой волны ему



97000 км/ч
500 км/ч
$\frac{c}{\lambda}$
$\frac{c-v}{\lambda}$
$\frac{c+v}{\lambda}$
λ
c

будет казаться меньшей, чем наблюдателю, неподвижному относительно источника света.

Существуют формулы, по которым мы можем рассчитать фантастическую скорость фотонной ракеты, необходимую для того, чтобы, скажем, красный свет источника показался зеленым, когда ракета двигается навстречу источнику. Получается величина, равная 97 000 км/с!

Изменение длины волны при движении источника света и наблюдателя относительно друг друга называется **эффектом Доплера.** Этот эффект часто затрудняет спектральные исследования. Современные приборы разделяют линии спектра, у которых длины волн различаются лишь на 0,0002 нм ($2 \cdot 10^{-13}$ м). Однако это не помогает различить, или, как говорят физики, разрешить, очень близко отстоящие друг от друга спектральные линии. Атомы в нагретом газе движутся по разным направлениям. Длина волны кванта, испущенного атомом, который удаляется от спектроскопа, сместится в область длинных волн, а если атом движется в обратном направлении — к спектроскопу, то и длина волны сместится в область коротких волн. Спектральная линия атома как бы расширяется в результате движения атомов.

В пламени горелки атомы движутся хаотически со средней скоростью около 1000 м/с. Длина волны излучения атома, летящего к фокальной плоскости линзы спектроскопа, будет на 0,003 нм короче, чем у излучения с той же длиной волны 0,5 мкм, но испускаемого атомом, двигающимся в противоположном направлении, — линия как бы расширяется на величину 0,003 нм. «Расширение» мешало исследователям наблюдать подлинную структуру линий. Вот, например, желтые спектральные линии натрия. Однородные ли они или состоят из нескольких линий? На этот вопрос дали ответ остроумные опыты академика А. Н. Теренина и Л. Н. Добрецова.

Ученые создали узкий светящийся пучок атомов натрия и установили коллиматор спектроскопа перпендикулярно атомному пучку. Изменение частоты излучения пучка пропорционально составляющей скорости атома, направленной на наблюдателя или от него. Когда же наблюдатель видит пучок сбоку, эта составляющая равна нулю. В этом случае пропадает и «расширение» линий, и тесно расположенные линии проявляют свою структуру. Теренин и Добрецов обнаружили, что обе линии натрия $D_1 \lambda = 0{,}5896$ мкм и $D_2 \lambda = 0{,}5890$ мкм оказались двойными. Так была открыта сверхтонкая структура спектральных атомных линий.

После этого замечательного открытия была выяснена и причина сложной структуры спектральных линий. Оказалось, что появление сверхтонкой структуры вызывается взаимодействием электронной оболочки и атомного ядра.

Изменение частоты лазерного излучения, отраженного от движущегося предмета, определяется с очень большой точностью по сравнению с частотой лазерного «опорного» луча и луча, отраженного от предмета. По этому изменению несложно вычислить и скорость движения, скажем, частицы, увлекаемой потоком жидкости или газа, — величину, которую важно знать для решения многих практических задач. Исследуя движение жидкости, экспериментатор добавляет частицы в поток. По скоростям этих частиц удается определить скорость жидкости в различных местах потока. Так получают данные, необходимые при строительстве нефтепроводов, мощных насосов, проектировании каналов и плотин.

Если скорость частицы v такова, что $v \ll c$, а это практически всегда соблюдается, то $\nu = \nu_0 \left(1 + \frac{v}{c}\right)$. Можно получить эту формулу из очень простых рассуждений. Допустим, мы считаем «горбы» (максимумы) синусоиды световых колебаний. Если источник света относительно наблюдателя неподвижен, то за единицу времени

световая волна пройдет путь c и мимо него промелькнет $m=\frac{c}{\lambda}$ максимумов.

Двигаясь навстречу волне со скоростью v, мы за это же время встретим $\frac{c+v}{\lambda}$ максимумов. Число появившихся за единицу времени максимумов и есть частота ν. Теперь $\nu_0=\frac{c}{\lambda}$; $\nu = \frac{c+v}{\lambda} = \nu_0 + \nu_0 \frac{v}{c} = \nu_0 \left(1 + \frac{v}{c}\right)$ и скорость $v=\frac{\Delta v}{\nu_0}c$. Частота излучения ν_0 лазера известна. Величина $\Delta\nu$ определяется по интерференции опорного лазерного пучка и излучения того же лазера, отраженного от движущейся частицы. На рисунке 23, где показана движущаяся лестница, неподвижный наблюдатель за то же самое время встретит больше ступеней, чем поднимающийся вверх. Для подсчета числа встреченных ступеней за единицу времени подходят те же формулы, что и для расчета частоты света ν, если обозначить: λ — длина ступени, c и v — соответственно скорости лестницы и человека.

Комбинационное рассеяние. В 1927 г. индийский ученый Ч. Раман изучал рассеяние света в жидкостях. В это же время советские физики Г. С. Ландсберг и Л. И. Мандельштам исследовали спектры светового луча, рассеивающегося в твердых прозрачных телах. К своему удивлению, вместе со спектральными линиями источника, освещающего тело, ученые обнаружили новые линии — линии-спутники, лежащие по обе стороны спектральных линий источника.

Сразу же после своего открытия Раман по трансатлантическому кабелю послал краткое сообщение о своем наблюдении. Статья же советских ученых была опубликована обычным порядком и появилась позднее сообщения Рамана. Поэтому теперь линии-спутники в рассеянном свете называют **эффектом Рамана.** Это явление еще носит название **комбинационного рассеяния.**

В чем же суть комбинационного рассеяния света? Когда поток квантов с энергией $h\nu$ сталкивается с молекулами жидкости, то молекулы могут обмениваться своей энергией с фотонами. В процессе комбинационного рассеяния фотон внешнего источника света поглощается молекулой, и сразу же излучается другой фотон. При этом фотоны увеличивают или уменьшают свою энергию также квантами с энергией ΔE, равной энергии возбуждения молекул жидкости. Если молекула находится в невозбужденном состоянии, то фотон отдает ей энергию ΔE, а когда молекула возбуждена, то может случиться так, что фотон получит от молекулы ее энергию возбуждения ΔE. В результате возникают фотоны с энергиями $h\nu + \Delta E$ и $h\nu - \Delta E$.

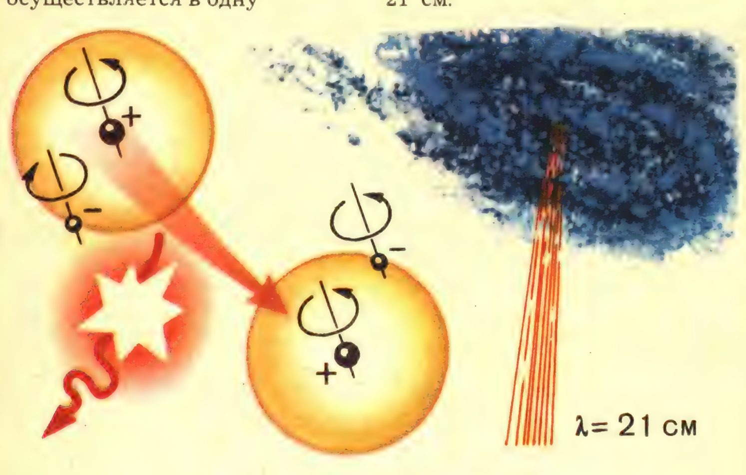
Таким образом, спутники спектральных линий источника света обладают интересным свойством: их частота «комбинируется» из частоты падающего на тело источника света и собственной частоты колебаний молекул при их возбуждении.

Если лазерный луч пропустить через нитробензол, то в прошедшем через нитробензол свете будет содержаться частота на 40 биллионов Гц меньше частоты испускаемого лазером света. Это и есть частота, характерная для молекул нитробензола.

Под действием лазерного излучения в веществах возникают значительные потоки фотонов рамановского излучения. Если эти фотоны будут многократно проходить, скажем, через нитробензол, то за ними будут увлекаться новые и новые фотоны такой же энергии. Это явление называется **вынужденным комбинационным рассеянием.** При этом значительная доля лазерного светового потока становится светом с большей или меньшей длиной волны.

Если лазерное излучение сфокусировать в интенсивный пучок, то, пропуская его через жидкие, твердые и газообразные тела, можно во многих случаях получить интенсивное рамановское излучение. Так получаются

Рис. 24. При переходе из одного состояния, когда протон и электрон вращаются в разные стороны, в другое, когда их вращение осуществляется в одну сторону, атом водорода испускает квант энергии, которому соответствует излучение с длиной волны 21 см.



когерентные излучения в новых областях спектра с длинами волн, лежащими и в ультрафиолетовой, и в инфракрасной области спектра.

Вести из межзвездного пространства. Проще всего устроен атом водорода. Он состоит из двух элементарных частиц — протона и электрона. Когда электрон движется по ближайшей к протону орбите, атом водорода находится в его основном состоянии — у него минимальный запас энергии. Но у протона и электрона кроме взаимодействия, происходящего за счет их заряда, существует еще взаимодействие, обусловленное в конечном счете их собственным вращением (рис. 24). Когда и электрон и протон вращаются каждый вокруг

своей оси в одинаковом направлении (например, по часовой стрелке), связь их между собой больше, чем если они вращаются в разные стороны. Это значит, что при «согласном» вращении запас энергии в атоме меньше, чем при вращении в «несогласном» направлении. Если электрон и протон вращаются в «несогласном» направлении, то у атома есть запас энергии, который он может израсходовать и перейти в состояние, когда протон и электрон будут вращаться в одном направлении. Такой переход может произойти либо при столкновении атомов, когда избыток энергии будет передан другому атому, либо атом водорода сам испустит квант электромагнитного излучения с длиной волны 21 см.

В земных условиях атом газа сталкивается со своими «соседями» или стенками сосуда, в котором он заключен, от миллиардов до сотен миллиардов раз в секунду, а на то, чтобы атом водорода отдал свою энергию, испустив самопроизвольно квант — 21 см, в среднем требуется 11 млн. лет! Поэтому в земных условиях атом не успевает отдать энергию в виде излучения с длиной волны 21 см. Эта энергия перейдет в другие формы в результате столкновения.

Иное дело — межзвездное пространство. Здесь атомы на больших расстояниях друг от друга и сталкиваются редко: в среднем между двумя столкновениями проходит 300 лет.

В 1944 г. голландский студент-физик Ван де Хулст сделал доклад в Лейденском университете. В своем докладе он утверждал, что атом водорода должен излучать в межзвездном пространстве радиоволну длиной 21 см.

В то время Голландия была оккупирована фашистами. Научные связи между учеными разных стран были прерваны. Лишь в 1947 г. идея Ван де Хулста стала известна широким кругам ученых.

Советский астрофизик И. С. Шкловский провел интересные и важные вычисления. Оказалось, что обна-

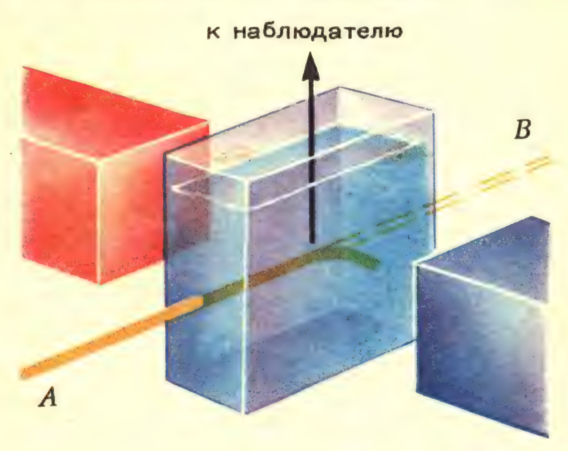
ружить излучение межзвездного водорода — вполне разрешимая задача. Исследования этого излучения дают сведения о движении межзвездной материи и о структуре межзвездного пространства. Регистрируя излучение с длиной волны 21 см, ученые изучили структуру и движение Галактики. Исследования излучения межзвездного вещества продолжаются.

«Поющие» электроны. Если заглянуть в ядерный реактор «плавающего типа», т. е. в реактор, в котором урановые стержни погружены в воду, то можно увидеть яркое голубое свечение, окружающее стержни. Это излучение было открыто задолго до пуска первого реактора, в 1934 г., в Ленинграде, советским физиком П. А. Черенковым.

Атомы разреженных газов и нагретых твердых тел, поглощая какую-либо энергию, например световую, могут переходить в возбужденное состояние и отдавать эту энергию в виде светового излучения. Если от момента поглощения этой энергии атомом до его высвечивания проходит какое-то определенное время, то излучение называется **люминесценцией.**

Изучая люминесценцию солей урана под действием γ-лучей радия, Черенков обратил внимание, что так же, хотя и значительно слабее, светится вода, в которой этих солей нет. Сначала он предположил, что свечение происходит за счет находящихся в жидкости примесей. Но контрольные опыты не подтвердили это предположение, под действием γ-лучей одинаково светились любые чистые жидкости. Кроме того, люминесценцию обычно можно «потушить», добавляя в жидкость некоторые соединения, например йодистый калий или азотнокислое серебро. Но излучение, открытое Черенковым, «потушить» не удавалось. Следовательно, наблюдаемое излучение не имело отношения к люминесценции. И надо было установить: какова же природа неизвестного излучения?

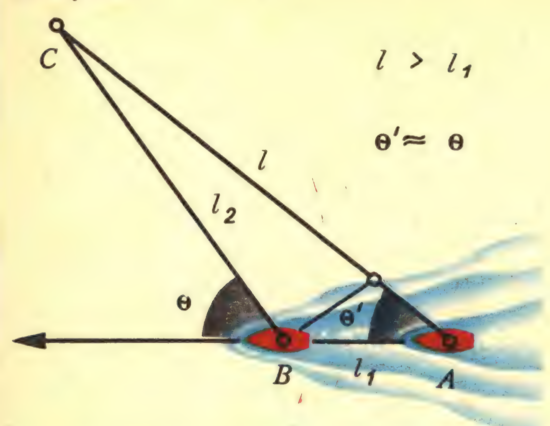
Рис. 25. Магнитное поле, проходящее через жидкость по направлению, показанному на рисунке, отклоняет вниз электроны, летящие по направлению *AB*. Свет распространяется по направлениям, близким к траекториям электронов. Поэтому в глаз наблюдателя попадает минимальное количество света, когда электроны отклоняются вниз. Если изменить направление магнитного поля, яркость свечения, воспринимаемого наблюдателем, возрастет, потому что при этом электроны отклоняются вверх к наблюдателю.



Гамма-лучи — такие же электромагнитные колебания, как и свет. Только энергия γ-кванта, например испускаемого радием, превосходит энергию кванта зеленого света в сотни тысяч раз. Проходя через вещество, γ-кванты передают его электронам часть своей энергии, и электроны начинают двигаться с большой скоростью. Может быть, таким движением электронов и создается свечение жидкости?

Можно изменить направление движения электронов, например, с помощью магнитного поля. Дальнейшие опыты Черенкова показали, что свечение сильно зависит от направления магнитного поля, пронизыва-

Рис. 26. Рождение «поющих» электронов.



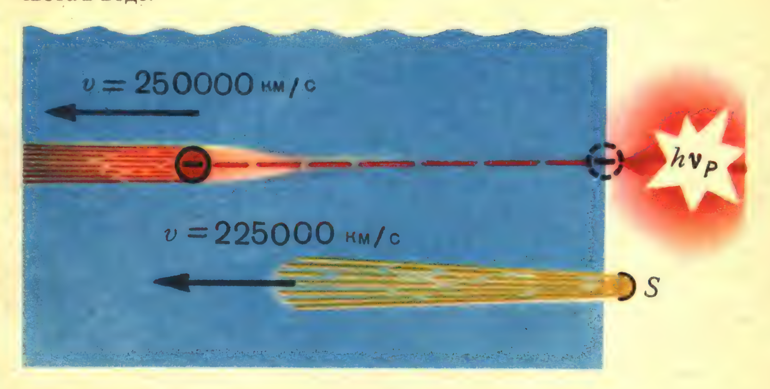
ющего исследуемую жидкость (рис. 25). Значит, свечение вызвано электронами. Академик С. И. Вавилов, руководивший работами Черенкова, предложил объяснить свечение облучаемой жидкости торможением электрического заряда в веществе. Уменьшение скорости заряда изменяет его электромагнитное поле, а изменение электромагнитного поля всегда сопровождается излучением.

Но это предположение не подтвердилось. Расчеты давали величину яркости в сотни раз меньшую, чем опыты. Кроме того, тормозное излучение сильно зависит от атомного номера жидкости, в которой тормозится электрон, а опыты показали, что яркость излучения, открытого Черенковым, не зависит от этого атомного номера.

Так ученые убедились, что это свечение — новый, еще неизвестный вид излучения света.

Полет равномерно движущейся пули сопровождается свистом. Пуля «поет», когда летит в воздухе быстрее скорости звука, т. е. со скоростью большей,

Рис. 27. Скорость электрона в воде больше, чем скорость света в воде.



чем 330 м/с. Если скорость пули меньше 330 м/с, она летит бесшумно.

Обозначим скорость пули и скорость звука буквами v и u. Каждая точка траектории пули — источник гармонических колебаний, распространяющихся со скоростью u.

Из точки A в точку C (рис. 26) звуковые колебания дойдут за время $\frac{l}{u}$, а из точки B — за время $\frac{l_2}{u}$. Но в точке B они возникли позднее на время $\frac{l_1}{u}$. Таким образом, колебания, пришедшие из точки D, отстанут от колебаний, пришедших из точки A, на время:

$$\tau = \frac{l_1}{v} - \frac{l_2}{u} - \frac{l}{u} = l_1\left(\frac{1}{v} - \frac{\cos\Theta}{u}\right).$$

Если v меньше u, то колебания, складываясь, погасятся, и пуля «петь» не будет. Если же v больше u, то фронт звуковой волны будет распространяться под углом Θ к направлению полета пули. Этот угол определится из условия:

$$\frac{1}{v} - \frac{\cos\Theta}{u} = 0, \text{ или } \cos\Theta = \frac{u}{v}.$$

Все это справедливо не только для звуковых волн, но для любых других, в том числе и для электронных волн. Когда в веществе движется с постоянной скоростью электрон, то в каждой точке его траектории возникают электромагнитные волны.

Если скорость электрона меньше, чем скорость распространения электромагнитных колебаний, то волны в результате интерференции погасятся, так же как и при полете пули в воздухе.

Чтобы электроны «пели», т. е. чтобы за счет их движения в веществе генерировался свет, нужно, чтобы скорость их была больше скорости света.

Но ведь скорость света — предел, через который не может перейти никакая движущаяся частица. Да, это справедливо, но только для вакуума. В веществе скорость света равна $\frac{c}{n}$ (n — показатель преломления, c — скорость света в вакууме). Поэтому электрон, получив от γ-кванта радия достаточную энергию, может двигаться со скоростью, большей чем $\frac{c}{n}$. Гамма-лучи радия разгоняют электрон до 250 000 км/с. Показатель преломления у воды 1,333, следовательно, $\frac{c}{n} = 225\,000$ км/с. Получается, что электрон может двигаться в воде быстрее, чем в ней распространяется свет (рис. 27).

Так в 1937 г. объяснили свечение Черенкова советские физики И. Е. Тамм и И. М. Франк. Опыты подтвердили все их теоретические выводы. Исследования советских ученых помогли выяснить и рассчитать многие характеристики излучения: угол между направлением излучения электрона и траекторией его полета, интенсивность излучения, зависимость его от скорости электрона, его спектральный состав.

В наше время **эффект Вавилова—Черенкова** открыл новые пути в исследованиях процессов, протекающих под действием ядерных частиц с высокой энергией. На его основе созданы, например, регистраторы быстрых протонов.

Поляризация света. Французский ученый-физик Этьен Малюс, устав от забот тяжелого дня, любовался закатом. Солнечные лучи отражались в великолепных окнах Люксембургского дворца, возвышавшегося на противоположном берегу Сены. Случайно в руках Малюса оказался кристалл исландского шпата. По детской привычке — мальчиком Этьен любил рассматривать небосклон через цветные стеклышки — учёный поднес кристалл к глазам. Повернув кристалл, он заметил, что свет, отраженный окнами, померк. При вращении кристаллической пластинки окна становились то темнее, то светлее! Малюс проверил новое явление в лаборатории. Получалось, что не только солнечный свет, но и свет любого источника, отраженный стеклом, минералом или какой-либо полированной поверхностью, меняет свою яркость при прохождении через кристалл исландского шпата в зависимости от угла поворота кристалла.

Это свойство световых лучей в 1808 г. Малюс назвал **поляризацией света**. С тех пор слова «поляризация света» прочно вошли в словарь физиков и инженеров. На основе явления поляризации света измеряют концентрацию растворов, определяют механические напряжения в сложных конструкциях. На этом явлении основано устройство быстродействующих оптических затворов, необходимых и для скоростной фотографии, и для лазеров.

В чем же природа поляризации световых волн? В естественном свете, испускаемом Солнцем, электрический и магнитный векторы колеблются хаотически, меняя свое направление в плоскости, перпендикуляр-

ной направлению распространения света. Если в ориентации векторов наблюдается какая-либо упорядоченность, то свет называют поляризованным. Примеры поляризации — круговая и эллиптическая, когда концы векторов электрического и магнитного полей, колеблющихся в световой волне, описывают окружность или эллипс. Наиболее простой случай — линейная поляризация света. У линейно поляризованного света направление колебаний векторов E и H остается постоянным во времени. Отражаясь от стеклянной поверхности, солнечный свет частично поляризуется. Такой свет ослабляется по-разному, проходя через кристаллические тела в зависимости от угла, который луч образует с осью кристаллической решетки. Поэтому отраженный оконными стеклами свет будет менять свою интенсивность при прохождении через пластинку исландского шпата или турмалина, если благодаря вращению угол между лучом и осью кристалла будет меняться.

Чтобы изучать поляризацию в лабораторных условиях, берут две пластинки, скажем, турмалина, с плоскостями, параллельными оси кристаллической решетки. Такая пластинка турмалина пропускает лишь составляющие световой волны, у которых электрический вектор направлен параллельно оси кристалла. Когда на кристалл падает солнечный свет, то сквозь него всегда будет проходить только половина света, потому что колебания с векторами E, перпендикулярными оси, не пройдут через кристалл.

Доля прошедшего через кристалл света не зависит от положения кристалла. Это легко понять, если вспомнить, что направления E в естественном свете хаотичны. Однако в прошедшем свете вектор ориентирован только в одном направлении. Теперь, падая на вторую пластинку, он может полностью поглотиться ею, когда ось кристалла и направление колебаний перпендикулярны между собой, и, наоборот, пройти через нее без



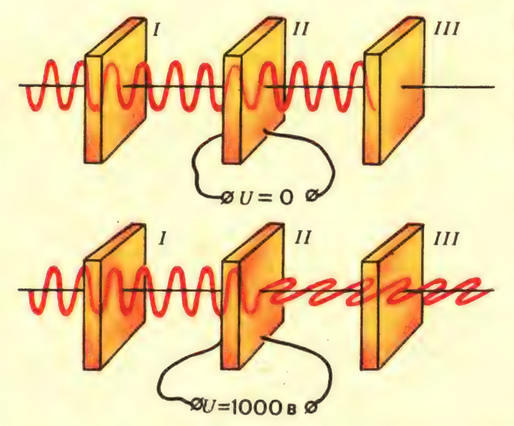


Рис. 28. Поляризация света. Принцип действия скоростного электронно-оптического затвора.

потерь, если направления колебаний и оси кристалла параллельны.

Существуют кристаллы, которые под действием приложенного к ним электрического напряжения поворачивают плоскость поляризации проходящего через них света. При этом угол поворота пропорционален толщине кристалла и величине приложенного напряжения.

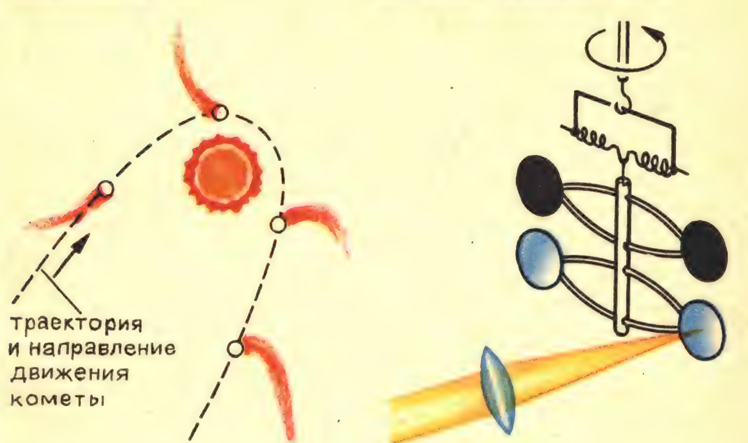
Поворот плоскости поляризации происходит за очень короткое время — всего за миллиардную долю секунды!

Большая скорость поворота плоскости поляризации позволяет создать сверхбыстрый световой затвор (рис. 28). Свет, падающий на вход затвора, поляризуется кристаллом I. Если на кристалле II напряжение равно нулю, то направление поляризации света, прошедшего через этот кристалл, не меняется и свет полностью задерживается кристаллом III, который пропускает свет с направлением поляризации, перпендикулярным направлению поляризации луча, прошедшего входной кристалл I. Чтобы свет прошел через затвор, кристалл II должен повернуть его плоскость поляризации. Если теперь на кристалл II подать напряжение, достаточное для поворота плоскости поляризации на 90°, то луч не будет задержан кристаллом III и затвор пропустит свет.

Электронно-оптические затворы нужны не только для скоростной фотографии. Они играют большую роль и в лазерной технике. Лазер во многих случаях практического применения должен обладать большой импульсной мощностью. Это означает, что энергия, запасенная атомами активного тела лазера, должна освобождаться за очень малое время. Если зеркала у торцов лазера во время освещения импульсными лампами стержня лазера будут открыты, то лазерный луч будет выходить через полупрозрачное зеркало в пространство за время, соизмеримое со временем импульса освещающих ламп. Это время порядка тысячной доли секунды. Если же между зеркалом и торцом стоит затвор, то длительность лазерного импульса будет равна времени срабатывания затвора. Затвор следует открыть в конце импульса накачки. Тогда вся энергия, запасенная в излучающем теле лазера, высветится за миллиардные доли секунды и мощность лазерного импульса будет почти в миллион раз выше по сравнению с мощностью, полученной без затвора.

Рис. 29 а. Отклонение хвоста кометы под действием солнечного света.

Рис. 29 б. Опыт Лебедева по изучению давления света.



Световое давление. Мы знаем, что свет поглощается веществом и передает ему свою энергию. Но оказывает ли световой поток на тело механическое воздействие? Еще в давние времена неоднократно высказывалось предположение о существовании светового давления. В 1604 г. немецкий астроном Кеплер объяснил форму хвоста кометы влиянием светового давления (рис. 29а). Однако теоретически доказать существование светового давления удалось лишь 250 лет спустя английскому физику Максвеллу. Он вычислил световое давление, исходя из теории электромагнитного поля.

По расчетам Максвелла получалось, что если за 1 с на единицу площади падает и поглощается полностью световая энергия E, то световое давление P равно $\frac{E}{c}$. При полном отражении света давление будет вдвое большим: $\frac{2E}{c}$.

Если представить себе свет, падающий на какую-то отражающую поверхность, как поток частиц-фотонов,

то фотоны можно рассматривать как обычные шарики, упруго отражающиеся от поверхности или поглощаемые ею. Когда фотон падает перпендикулярно к идеально отражающей поверхности, его вектор количества движения меняет свое направление на противоположное. Полное изменение Δp этого вектора равно $2p$. Если на единицу площади каждую секунду падает один фотон, то величина Δp будет равна давлению света на поверхность. Сравним результат с формулой Максвелла. По этой формуле $P=\frac{2E_ф}{c}=2p$, если на поверхность падает в секунду один фотон с энергией $E_ф$. Из предыдущей формулы следует: $E_ф=pc$, где p — количество движения фотона. Но количество движения частицы равно ее массе, умноженной на скорость. Скорость фотона — это скорость света. Отсюда можно прийти к выводу: $E=m_фc^2$. Если этот вывод обобщить на любую массу, то получится формула Эйнштейна $E=mc^2$.

На 1 м^2 поверхности в солнечный полдень световые лучи создают механическое усилие около 0,00039 Н. Такую незначительную силу очень трудно измерить на опыте. Поэтому некоторые ученые сомневались в теоретических результатах, полученных Максвеллом. Необходимо было подтвердить формулу Максвелла прямыми измерениями светового давления.

Существование светового давления опытным путем впервые установил русский физик П. Н. Лебедев в 1899 г. На тонкой нити он подвесил две пары крылышек, одна из которых была зачернена, а другая была зеркальной (рис.29б).

Все устройство было помещено в вакуум. Свет практически полностью отражался от зеркальной поверхности крылышка, и его давление на это крылышко было вдвое большим, чем на зачерненное. Благодаря этому устройство поворачивалось, и по углу поворота измерялась сила, действовавшая на крылышки, а значит, и давление света.

На первый взгляд опыт кажется простым. Однако такое впечатление обманчиво. «Я всю свою жизнь воевал с Максвеллом, не признавая его световое давление, и вот опыты Лебедева заставили меня сдаться», — сказал английский физик Д. Томпсон, познакомившись с опытами русского ученого.

Притягиваются ли телами фотоны? Любые тела во Вселенной притягиваются друг к другу по закону всемирного тяготения, открытому Ньютоном более 200 лет назад. А как обстоит дело с такой необычной формой материи, как свет? Притягиваются ли телами фотоны — эти частички светового потока?

В начале нашего века Альберт Эйнштейн начал разрабатывать очень сложную физическую теорию, которая получила название общей теории относительности. По расчетам Эйнштейна выходило, что притяжение световых квантов можно обнаружить только в очень сильных полях тяготения, например на малых расстояниях от поверхности Солнца, где сила тяготения особенно велика.

В начале 1919 г. были снаряжены две экспедиции. Одна из них расположилась неподалеку от бразильского города Сорбаль, а другая экспедиция — на острове Принсипи у берегов Западной Африки. В этих местах в мае 1919 г. должно было наступить полное солнечное затмение.

Кроме обычных исследований солнечной короны решили проверить выводы эйнштейновской теории. Нужно было определить положение звезд, видимых в телескоп на одном и том же участке неба, в двух случаях — когда звездные лучи идут вдалеке от Солнца и когда они падают на Землю вблизи солнечного диска. По изменению положения звезды можно судить об отклонении ее лучей полем тяготения Солнца. В то время наблюдать звезды вблизи солнечного диска можно было только во время полного солнечного затме-

Рис. 30 а. Поле тяготения Солнца отклоняет лучи света звезды A.



Рис. 30 б. Приращение энергии кванта в поле тяготения Земли.



ния, иначе звезды не видны на фоне яркого света, рассеиваемого атмосферой.

29 мая 1919 г. ученые убедились — луч света отклоняется притяжением Солнца именно так, как предсказывала общая теория относительности (рис.30а). Узнав об этом, Эйнштейн написал Планку: «Судьба оказала мне милость, позволив дожить до этих дней...»

В наши дни эффект притяжения силами тяготения квантов электромагнитного излучения наблюдался и в

земных условиях. По предсказаниям Эйнштейна квант электромагнитного излучения с энергией E ведет себя в поле тяготения как частица с массой $\frac{E}{c^2}$. Падая с высоты H, квант должен приобрести дополнительную кинетическую энергию $\Delta E = mgH$, где g — ускорение силы тяжести. Чем больше энергия кванта, тем больше его частота ν. Нетрудно видеть, что частота кванта, «упавшего» с высоты H, возрастет на величину $\Delta\nu = \frac{\Delta E}{hc^2} gH$. При движении против силы тяготения энергия и частота кванта убывают.

В поле земного тяготения изменение энергии кванта под действием силы тяжести ничтожно. Так, «падая» с высоты 1 м, квант увеличивает свою энергию на долю, равную $\frac{\Delta E}{E} = \frac{gH}{c^2} = \frac{9{,}81 \cdot 1}{9 \cdot 10^{16}} = 10^{-16}$! Казалось, что подобное изменение энергии невозможно заметить с помощью самых тонких методов, имеющихся в распоряжении ученых. И все же немецкому ученому. Р. Мессбауэру в 1958 г. на основе открытого им эффекта резонансного поглощения гамма-квантов удалось создать новый метод регистрации малейших изменений энергии квантов, испускаемых некоторыми атомными ядрами. Год спустя, используя метод Мессбауэра, американские физики Паунд и Ребка наблюдали прирост кинетической энергии кванта, «падавшего» с высокой башни Гарвардского университета (рис. 30б). Они измерили относительное приращение энергии, равное $2{,}5 \cdot 10^{-15}$. Зарегистрированный земной эффект оказался в миллиард раз меньше наблюдаемого астрофизиками солнечного эффекта во время полного затмения. Полученные данные полностью согласовывались с теорией Эйнштейна.

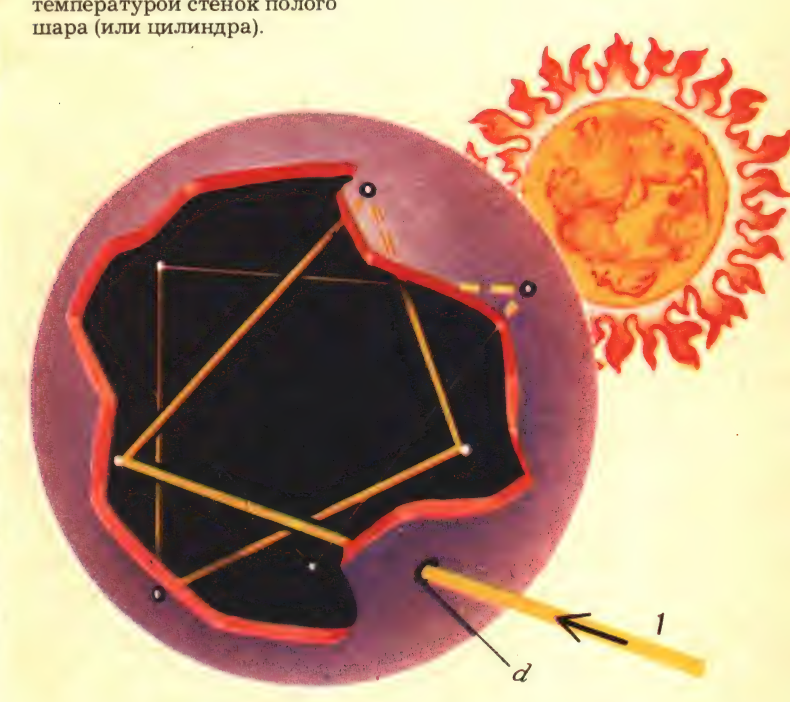
Нагретое тело. Физики умели рассчитать поток звездного излучения в зависимости от спектрального состава излучения звезды, ее цвета. При этом звезду рассматривали как нагретое твердое тело. Расчеты производились по формулам, основанным на земных измерениях излучений нагретых тел. Однако ученые столкнулись с большими трудностями, когда пытались теоретически объяснить законы излучения самого распространенного источника света — нагретого твердого тела. Ведь это и нить электрической лампы накаливания, и раскаленные топки печей, и тело человека. Да и главный источник энергии — Солнце — излучает по законам, близким к законам излучения нагретого твердого тела. Конечно, мимо такой задачи пройти было невозможно.

В начале нашего века английский ученый Д. Джинс рассчитал состав излучения в полости замкнутого сосуда со стенками, нагретыми до определенной температуры. Свои расчеты Джинс основывал на теории электромагнитного поля Максвелла, предположив, что нагретая полость непрерывно испускает волны. В результате Джинс установил, что частоты излучения внутри полости определяются только температурой стенок и не зависят от того, из какого материала они сделаны. Если в полости просверлить маленькое отверстие, то из него должно выходить излучение, практически ничем не отличающееся от возникающего внутри замкнутого нагретого сосуда. Говорят, что такое отверстие излучало бы так же, как абсолютно черное тело (рис.31).

Понятие «абсолютно черное тело» играет важную роль в теоретической физике. Когда физик что-то называет абсолютно черным, это не нужно понимать буквально. Просто названный так предмет полностью

Рис. 31. Модель абсолютно черного тела. Так называют полый шар (или цилиндр) с зачерненными стенками и с круглым отверстием d. Вошедший в отверстие луч 1 не выходит обратно. После многократных отражений от зачерненных стенок луч поглощается. Поэтому из отверстия d выходит излучение, характер которого определяется только температурой стенок полого шара (или цилиндра).

Интересно отметить, что Солнце испускает свет по закону, близкому к закону излучения абсолютно черного тела.

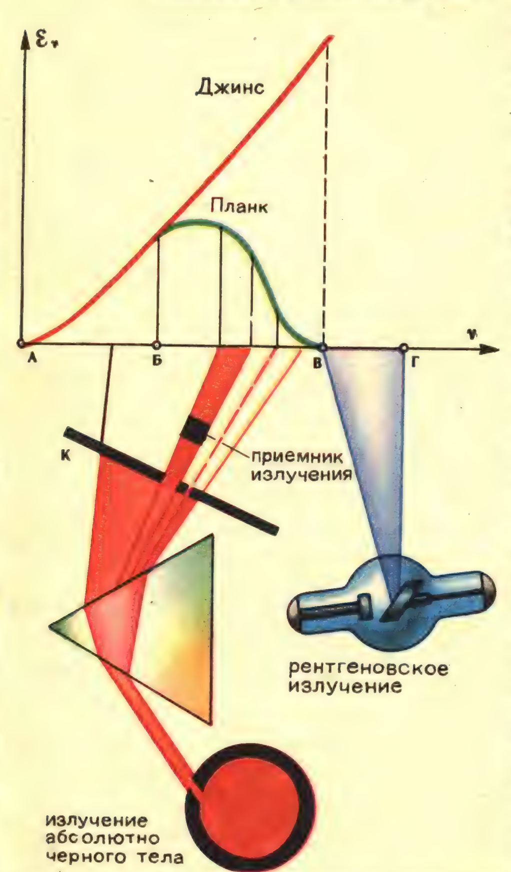


поглощает все падающие на него лучи любой длины волны. Отверстие в замкнутой полости почти целиком поглощает падающий на него свет, но это совсем не означает, что оно не испускает никаких лучей, что оно «черное». Происходит как раз обратное: поток излучения единицы площади отверстия «абсолютно черного тела» больше потока излучения с единичной площади поверхности любого другого тела, нагретого до такой же температуры. Причем этот поток излучения очень быстро растет с увеличением температуры, он пропорционален ее четвертой степени. Такая зависимость излучения от температуры называется законом Стефана—Больцмана. Для абсолютно черного тела закон записывается так: $\varphi = \sigma H T^4$. Здесь φ — поток излучения (Вт), испускаемый поверхностью тела; H — площадь поверхности (м^2); σ — постоянная Стефана—Больцмана, равная $5{,}67 \cdot 10^{-8}$ Вт$\cdot$м$^{-2}\cdot$град$^{-4}$. Оценим по этой формуле поток электромагнитного излучения, испускаемый 1 кв.м солнечной поверхности. Получим весьма значительную мощность: 75 МВт/м^2, приняв, что Солнце излучает по закону, близкому к законам излучения абсолютно черного тела, а его температуру на поверхности равной 5800 K.

Загадка излучения черного тела. Не только мощностью характеризуется излучение нагретых тел. С повышением температуры меняется цвет тела: от темно-красного у нагретой печи до ослепительно белого цвета Солнца — все бо́льшая доля энергии приходится на область высоких частот. Меняется спектральный состав излучения. Зависимость излучаемой энергии от частоты ν физики устанавливают в процессе измерения энергии, заключенной в узких интервалах частот, например на участке от ν_1 до ν_2

Если энергию, излучаемую телом в участке спектра от ν_1 до ν_2, разделить на его ширину $\Delta\nu = \nu_2 - \nu_1$, то получится величина ε_ν — излучательная спо-

Рис. 32. По теории Джинса, излучательная способность абсолютно черного тела ε_ν должна все время возрастать с увеличением частоты световых колебаний ν. Тогда любое нагретое тело излучало бы в диапазоне ВГ рентгеновские лучи. По теории Планка, излучательная способность возрастает лишь до определенной частоты, а затем убывает. Получается зависимость с максимумом. Опыт подтверждает теорию Планка. Если на пути излучения абсолютно черного тела поставить призму, то световые волны с малыми частотами колебаний будут меньше отклоняться призмой, чем световые колебанияс большей частотой. Измерив энергию лучей, соответствующих волнам с различной частотой колебаний, приемником лучистой энергии, который передвигается параллельно плоскости *K*, можно получить зависимость, отображенную формулой Планка.



собность абсолютно черного тела для частоты ν, лежащей между ν_1 и ν_2. Если теперь отложить по оси ординат измененные на опыте значения ε_ν, а по оси абсцисс —

соответствующие им частоты, то получится кривая с максимумом. А вот теоретическая формула Релея—Джинса — парабола: $\varepsilon_\nu = \frac{2\pi\nu^2 kT}{c^2}$ кривая, у которой нет максимума (рис.32). Получалось, что закономерность, установленная независимо Релеем и Джинсом, совпадает с опытными данными только для малых частот, на участке в окрестности начала координат в диапазоне *АБ*. В остальном эта формула нелепа. Из нее следует, что при любой температуре тела львиная доля излучения приходится на область коротких волн.

Самое коротковолновое излучение, которое еще чувствует наш глаз, — фиолетовое. Поэтому из расчетов Релея и Джинса следовало, что в излучении любого нагретого тела должно быть больше всего фиолетовых лучей. Теория приводила к выводу, что теплая печка должна светиться фиолетовым светом! Но расчеты Релея и Джинса были сделаны без ошибок, и в их основе лежали проверенные законы классической физики.

В чем же загадка излучения нагретых тел? Не сразу удалось решить одну из сложнейших проблем, которые когда-либо вставали перед учеными.

Немецкий теоретик Макс Планк первый нашел зависимость характеристик излучения тела от его температуры. Дело было нелегким. Планк затратил два года, чтобы подобрать формулу, вычисления по которой совпадали бы с опытными данными. Вот знаменитая формула, носящая его имя: $\varepsilon_\nu = \frac{2\pi h\nu^3}{c^2\left(e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1\right)}$. Здесь h — постоянная Планка, равная $6{,}62 \cdot 10^{-34}$ Дж·с, c — скорость света, k — постоянная Больцмана, равная $1{,}38 \cdot 10^{-23}$ Дж·град. Умноженная на температуру T, постоянная Больцмана дает среднюю энергию колебаний атомов.

Появление слова «квант». Чтобы понять протекание физического процесса, еще недостаточно располагать

формулой, которая правильно связывает его основные характеристики. Важнее другое — установить предпосылки, на которых основана полученная закономерность. Планк после длительных исследований понял, что, исходя из представлений о свете как о непрерывном волновом процессе, вывести открытую им формулу невозможно. Формула получилась только в предположении, что свет излучается порциями, **квантами**, причем энергия кванта должна равняться $h\nu$. Это предположение противоречило всем существовавшим в то время представлениям о волновой природе света!

Однако другого выхода найти не удалось, и в 1900 г. Планк опубликовал полученные им результаты, сам еще до конца не веря в существование квантов световой энергии. В то время Планк рассматривал кванты как вспомогательное понятие, с помощью которого можно получить верную зависимость ε_ν от частоты излучения и температуры нагретого твердого тела.

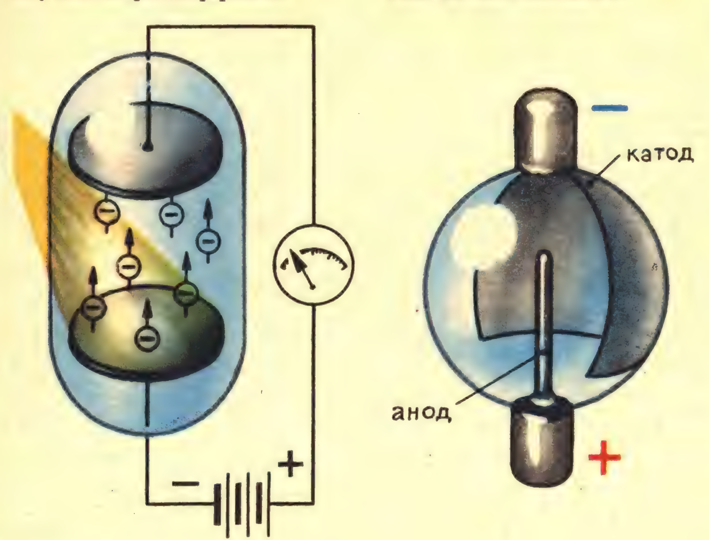
Позднее, вспоминая о первой «квантовой» работе Планка, Эйнштейн говорил: «...Планк посадил в ухо физикам блоху». Эта «блоха» — мысль о квантовом характере электромагнитного излучения в конечном итоге и привела к созданию современной квантовой теории.

Планк предполагал, что прерывно — квантами — свет только излучается, а распространяется как волна. На вопрос о способе поглощения света теория Планка ответа не давала. Необходимо было выяснить: носит ли поглощение непрерывный или квантовый характер?

Кванты и электроны. Еще в 1887 г. физики открыли явление, получившее впоследствии название **фотоэффекта**. Явление заключалось в том, что из освещенной металлической пластины, помещенной в сосуд, из которого тщательно откачан воздух, вылетают отрицательно заряженные частицы — электроны (рис.33). В дальнейшем были измерены скорости вылетающих из

Рис. 33. Схема опыта по изучению фотоэффекта.

Рис. 34. Фотоэлемент.



пластины электронов. Оказалось, что они возрастают с уменьшением длины волны падающего света. Так, максимальная скорость электронов, покидающих пластину, освещенную красным светом, была почти вдвое меньше скорости электронов, вылетавших при освещении той же пластины фиолетовым светом. Удивительным было то, что скорости электронов не зависели от количества света, падающего на пластину. Если бы на пластину падала непрерывная волна, то скорости вырванных из нее электронов должны были бы возрастать с увеличением ее амплитуды, т. е. с увеличением количества света, поглощаемого единицей поверхности.

Загадка фотоэффекта становилась понятной, если световой поток представлять в виде отдельных частиц-квантов; энергию кванта выражать зависимостью $h\nu$.

Энергия кванта при его столкновении с веществом пластины расходуется, во-первых, на работу A, которую нужно затратить, чтобы вырвать электрон из металла, и, во-вторых, на то, чтобы сообщить ему скорость, увеличить его кинетическую энергию. На основании закона сохранения энергии можно записать сказанное словами в математической форме $h\nu = A + \frac{mv^2}{2}$. В этой формуле m — масса, а v — скорость электрона. Величина A — постоянная. Поэтому скорость электрона возрастает с увеличением частоты. Проверка на опыте полученного соотношения показала, что оно полностью объясняет закономерности фотоэффекта. Впервые его записал в 1905 г. А. Эйнштейн. Удачное объяснение нового явления на основе квантовых представлений стало еще одним доказательством прерывной структуры света.

Многие полупроводниковые материалы в лучах света уменьшают свое электрическое сопротивление потому, что в кристаллической решетке полупроводника под действием фотонов возникают «свободные» электрические заряды. Такое действие света называют **внутренним фотоэффектом**.

В Московском метро нельзя пройти через турникет, не опустив в его стойку пятикопеечную монету, — не пропустит световой луч. Он пересекает проход и попадает на фотоэлемент. Если закрыть луч, фотоэлемент подаст сигнал. Электронная схема усилит этот сигнал и передаст его на механическую систему, закрывающую турникет.

Фотоэлемент с **внешним фотоэффектом** устроен так. На стенку стеклянного баллона нанесен металлический слой, а поверх него — слой полупроводникового вещества, это катод. К катоду подведен отрицательный полюс батареи, а к аноду (никелевому стержню внутри баллона) — положительный (рис.34). Когда свет выбивает из катода электроны, в цепи фотоэлемента течет ток. Когда света нет, нет и тока. Действие фотоэлемента

можно усилить и использовать для управления любой механической системой.

В такую же схему, как и фотоэлементы с внешним фотоэффектом, могут быть включены и фотоэлементы с внутренним фотоэффектом. Их называют фотосопротивлениями. Они увеличивают или уменьшают сопротивление электрической цепи, в которую включены. Самое ценное свойство фотосопротивлений — их способность реагировать на излучение слабо нагретых тел: на лучистую энергию с большой длиной волны, т. е. на инфракрасные лучи.

Ученые уже создали фотосопротивления, чувствительные к лучам с длиной волны более 10 мкм. Вспомним закон Вина — закон смещения; $\lambda T = 2897$ мкм. Если $\lambda = 9{,}35$ мкм, то $T = \frac{2897}{9{,}35} = 309°K$, или примерно 36° С. Такие лучи испускает наше тело. Если бы человеческий глаз реагировал на эти излучения, мы ночью видели бы лица людей светящимися.

Атомы и кванты. Следующий шаг в развитии учения о квантах сделал датский физик Нильс Бор. Он задался целью объяснить излучение отдельного атома. В твердом теле атомы в сильной степени взаимодействуют между собой и поэтому испускают непрерывный спектр излучения, который не зависит от того, из какого сорта атомов состоит твердое тело: спектры нагретых кусков меди или железа не отличаются, если температура кусков одна и та же. Среди шума большой толпы невозможно разобрать отдельные голоса. Так и в твердом теле атомы теряют свою индивидуальность. В разреженных газах атомы находятся далеко друг от друга и не сталкиваются между собой во время излучения света. Поэтому, когда излучает газ, «слышны голоса» отдельных атомов.

«Планетарный» атом. Если перед щелью спектроскопа поставить колбу с водородом, светящимся под

действием электрического разряда, то можно обнаружить излучения с набором волн длиной 0,656 мкм, 486 мкм, 0,434 мкм и 0,410 мкм. Их принято обозначать H_α, H_β, H_γ, H_σ... Швейцарский учитель И. Бальмер решил найти связь между длинами волн, излучаемых водородом. Он подобрал формулу, по которой можно рассчитать длины волн H_α, H_β... Произошло это в 1885 г., а пятью годами позднее И. Ридберг придал формуле Бальмера современный вид: $\frac{1}{\lambda}=R\left(\frac{1}{2^2}-\frac{1}{n^2}\right)$. Постоянная величина $R=10\,967\,758{,}1$ м$^{-1}$ впоследствии была названа **постоянной Ридберга.** Длина волны какой-либо линии спектра водорода получается, если в формулу Бальмера поставить вместо n одно из целых чисел: 3, 4, 5 или 6. В то время ни Бальмер, ни Ридберг и никто другой из физиков не могли объяснить, почему именно такой зависимостью связаны между собой линии водородного излучения. Бальмер верил, что в природе всюду должен царить порядок, и ему удалось просто подобрать, или, как мы говорим, получить эмпирическую формулу. Формула оказалась точной. Разница между вычисленными по ней и измеренными на опыте длинами волн объяснялась лишь ошибками измерений. Открытие Бальмера ждало своего объяснения 28 лет. Для этого нужно было понять строение атома. Это понимание началось с работ великого английского физика Э. Резерфорда. В 1911 г. он показал опытным путем, что в атоме существует тяжелое положительно заряженное ядро, размеры которого чрезвычайно малы по сравнению с самим атомом. Резерфорд представлял атом в виде системы, похожей на Солнечную: вокруг ядра—Солнца вращаются планеты—электроны. Такую атомную модель называют планетарной (рис. 35). Любопытно отметить, что между атомным ядром и электронами действуют силы притяжения, обратно пропорциональные квадрату расстояния между ними. Зависимость сил притяжения в атоме от расстояния такая же,

как и в ньютоновском законе всемирного тяготения, управляющем движением планет.

Планетарное строение атома хорошо согласовывалось с опытными данными Резерфорда, но противоречило теории Максвелла. Из формул, полученных Максвеллом, следовало, что «планетарный» атом не может быть устойчивым. Вращающийся вокруг ядра электрон должен все время терять энергию и в конечном итоге «упасть» на ядро. Но ведь атомы устойчивы! Значит, планетарная модель не отражает строения атома... Однако великий физик Нильс Бор думал по-иному.

Квантовая теория Бора. В 1913 г. Нильс Бор нашел ключ к решению проблемы устойчивости планетарного атома. Теория Бора опиралась на экспериментальные исследования оптических спектров элементов, и прежде всего на зависимость, установленную Бальмером.

Атом водорода — простейший. Его ядро — положительно заряженная элементарная частица — протон, вокруг которого движется отрицательно заряженный электрон. Чем ближе орбита электрона к атомному ядру, тем меньше запас энергии атома, потому что с уменьшением расстояния между зарядами разных знаков их общая энергия убывает.

Бор предположил, что в атоме электроны могут двигаться только по определенным орбитам, которые он назвал разрешенными. С орбиты на орбиту электроны переходят только скачком. Если электрон переходит с какой-то разрешенной орбиты на более близкую к ядру, то атом испускает энергию в виде кванта электромагнитного излучения (рис. 35). Если же электрон переходит на дальнюю орбиту, то для этого атом должен поглотить квант энергии, равный разности между энергией атома, когда его электрон находится на дальней орбите, и энергией атома до поглощения кванта. Иными словами, каждой из орбит электрона соответствует определенная энергия атома.

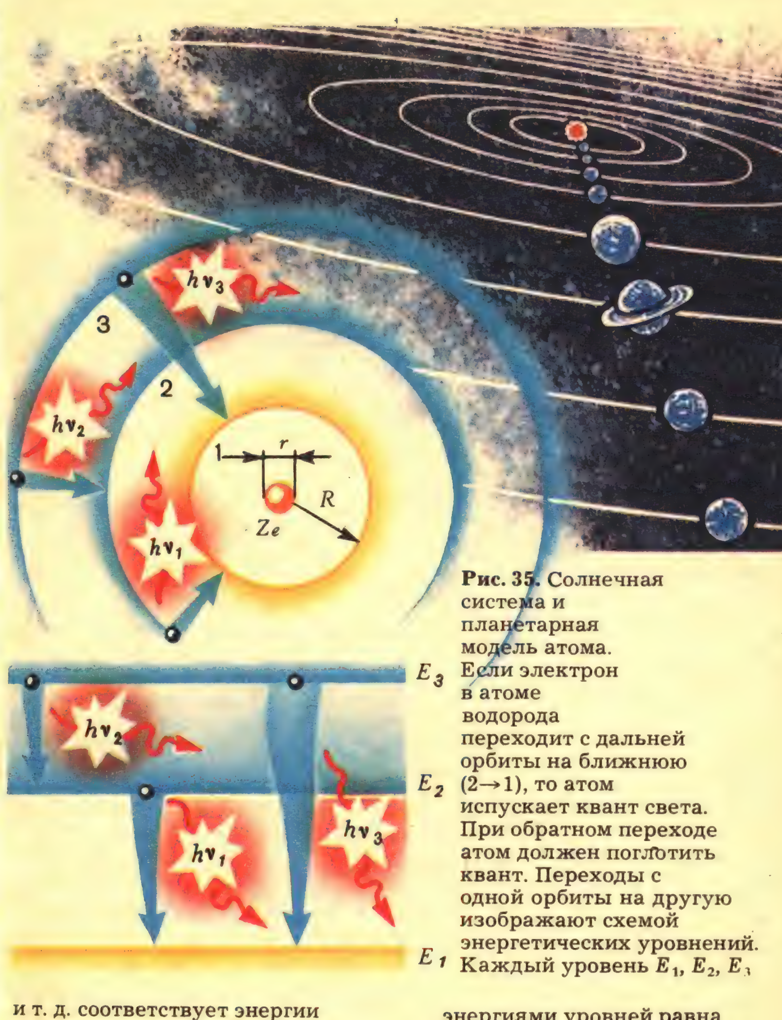


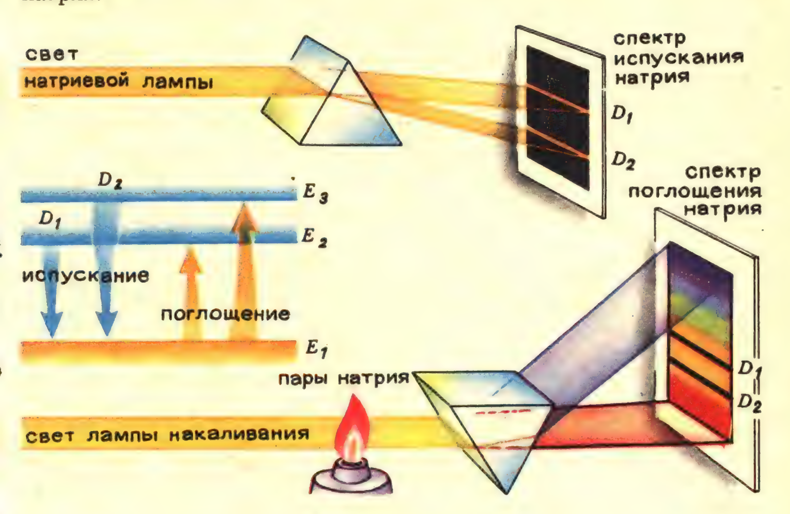
Рис. 35. Солнечная система и планетарная модель атома. Если электрон в атоме водорода переходит с дальней орбиты на ближнюю (2→1), то атом испускает квант света. При обратном переходе атом должен поглотить квант. Переходы с одной орбиты на другую изображают схемой энергетических уровней. Каждый уровень E_1, E_2, E_3 и т. д. соответствует энергии электрона на орбитах 1, 2, 3 и т. д. Разница между энергиями уровней равна энергии кванта, излучаемого или поглощаемого атомом.

Обозначим эту энергию буквой E_n (значок внизу означает номер орбиты и может принимать значения 1, 2, 3...). Величины E называют уровнями энергии атома. Бор предположил, что момент количества движения электрона равен целому кратному n от величины $\frac{h}{2\pi}$, т. е. $mvr=n\frac{h}{2\pi}$. Из этого условия и условия равновесия электрона на орбите $\frac{mv^2}{r}=\frac{Ze^2}{r^2}$ и получается формула Ридберга. Условие равновесия электрона на орбите такое же, как и для спутника Земли и планет. В левой части $\frac{mv^2}{r}$ — это центростремительное ускорение электрона на орбите (m — масса электрона, v — скорость, а r — радиус орбиты), в правой части — сила, создающая это ускорение, — притяжение электрона ядром, равное, по закону Кулона, произведению зарядов ядра ($Z\hat{e}$ и электрона (e), деленному на квадрат расстояния между ними. Дополнительное условие о прерывистом изменении момента количества движения электрона на орбите позволяет рассчитать разрешенные орбиты. Вся процедура, связанная с введением прерывных — квантовых — значений момента количества движения, называется **квантованием.**

В процессе испускания атомом кванта света с энергией $h\nu=E_2-E_1$ электрон переходит с разрешенной орбиты 2 на другую разрешенную орбиту — 1, а атом переходит с энергетического уровня E_2 на энергетический уровень E_1. По спектру свободных атомов и определяют частоты их излучений, а значит, и энергию, выделяющуюся при переходах атома с уровня на уровень, — энергетическое расстояние между уровнями.

Теория Бора — важный шаг в развитии квантовой теории излучения, квантовой механики. С помощью квантования Бор смог объяснить процессы, происходящие в атоме при излучении. По формулам Бора можно точно «рассчитать» атом водорода. Но объяснить с той же полнотой излучения сложных атомов

Рис. 36. Излучение и поглощение света атомами натрия.



на основе боровской теории не удалось, несмотря на все попытки ее усовершенствования. Однако с ее помощью все же можно понять характер излучения сложных атомов. Так, в спектре атома натрия, содержащего 11 электронов, можно видеть две близко расположенные линии яркого желтого цвета (рис. 36). Линии содержат световое излучение с длинами волн 0,5896 мкм (эту линию называют D_1) и 0,5890 мкм (линия D_2). Вычислив по формуле энергию квантов, нетрудно построить схему энергетических уровней натрия, с которых происходит излучение желтого дублета (так называют линии D_1 и D_2). Схема энергетических уровней помогает понять, почему на месте ярких линий D_1 и D_2 в сплошном спектре лампы накаливания появляются темные линии, когда ее свет проходит через пламя, подкрашенное солями натрия (рис. 36).

Сегодня спектры атомов и другие тонкие атомные явления ученые анализируют и осмысливают с помощью квантовой механики. Квантовая механика как раздел науки возникла после появления понятия «квант», которое пришлось ввести Планку для объяснения спектра абсолютно черного тела.

Очень важную роль в развитии квантовой механики сыграла замечательная работа Эйнштейна, появившаяся в 1917 г. В ней была получена теоретически важнейшая физическая закономерность — формула Планка. При этом Эйнштейн установил, что существует так называемое **вынужденное**, или **индуцированное**, излучение атомов — процесс, на основе которого созданы лазеры, самые совершенные из известных нам источников света.

Попробуем и мы разобраться в рассуждениях Эйнштейна. Их непросто понять. Поэтому окончание этого раздела тому, кто захочет его дочитать, доставит немало хлопот. Но вот тот, кто решил стать физиком, не пожалеет о затраченном труде. Разве не заманчиво научиться самому выводить первую квантовую формулу, понять, что такое индуцированное излучение, и, наконец, познакомиться с настоящим квантовым расчетом, да еще сделанным самим Эйнштейном! Уже ученик VII класса справится со всеми математическими выкладками, встречающимися при выводе формулы Планка по методу Эйнштейна.

Из теории Бора следовало: излучают отдельные атомы. В нагретом твердом теле атомы в сильной степени взаимодействуют между собой. Оказывается, это приводит к тому, что энергетических уровней, с которых атом может излучать, в нагретом твердом теле очень много. Эйнштейн рассмотрел два уровня атома с энергиями E_1 и E_2.

Атом с нижнего уровня E_1 перейдет на верхний E_2 только в том случае, если он поглотит порцию энергии $E_2 - E_1$, или, как теперь принято говорить, квант $h\nu_{12} =$

$= E_2 - E_1$. Попробуем подсчитать число таких переходов, скажем, за одну секунду.

Пусть на земле под яблоней лежит N_1 яблок (рис. 37). Яблоня не обычная, а квантовая. Если в плод, лежащий на земле, попадет квант $h\nu_{12}$, то яблоко поднимается и вновь прирастает к ветке. На N_1 яблок падает $I(\nu)$ квантов в секунду. Обозначим буквой S вероятность попадания кванта в яблоко. Величина S пропорциональна числу квантов, падающих на яблоки $S = B_{12}I(\nu)$. В самом деле, если вы стреляете по мишени, то чем больше выстрелов сделано вами (число $I(\nu)$), тем больше шансов попадания в нее. Больше чем $I(\nu)$ попаданий быть не может. Только при абсолютной меткости число попаданий могло бы равняться числу «выстрелов» $I(\nu)$. Но квантовый обстрел ведется без всякого прицеливания, и вот величина B_{12} учитывает меткость этого обстрела. Конечно, она всегда меньше единицы.

Теперь, чтобы получить полное число попаданий квантов в яблоко, нужно величину S умножить на число N_1. Полное число попаданий равно числу переходов земля — ветви за секунду. Эту величину обозначим K_{1-2}, $K_{1-2} = B_{12}\ I(\nu)N_1$. Теперь подсчитаем, сколько атомов в секунду переходит с верхнего уровня на нижний. Если на дереве N_2 спелых яблок, то, естественно, чем больше N_2, тем больше в единицу времени падает на землю яблок. Очевидно, что число яблок, самопроизвольно (спонтанно, как говорят физики) падающих на землю в единицу времени, пропорционально числу N_2. Получается формула: $K_{2-1} = A_{21}N_2$.

Необходимо, чтобы число падающих с квантовой яблони плодов K_{2-1} равнялось величине K_{1-2} — числу вновь поднимающихся на ветви. В противном случае величина $I(\nu)$ менялась бы во времени, а опыт показывает, что твердое тело, нагретое до постоянной температуры, или, точнее, находящееся в температурном равновесии, а именно такое тело мы и рассматриваем, в единицу времени испускает постоянное число квантов



E_2
N_2
$h\nu$
$h\nu$
$h\nu$
K_{1-2}
I
$B_{12}N_1I(\nu) = B_{21}N_2I(\nu) + A_{21}N_2$
III
II
K_{2-1}
N_1
$h\nu$
$h\nu$
E_1

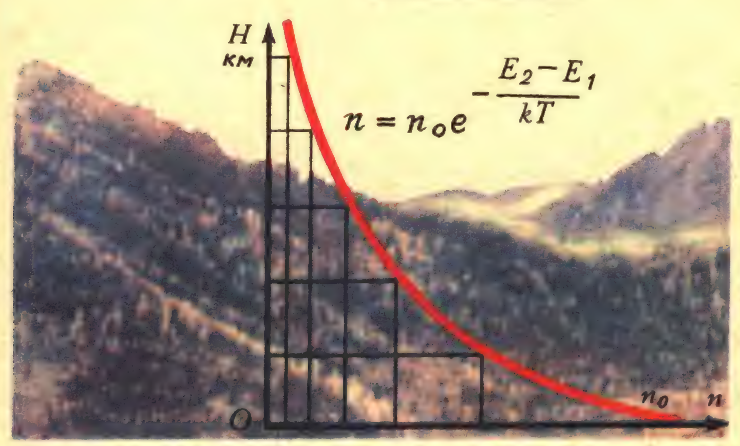
Рис. 37. Схема «квантовой яблони» помогает понять рассуждения Эйнштейна. I — поглощение света; II — спонтанное излучение; III — индуцированное (вынужденное) излучение.

$I(\nu)$. Приравняем теперь величины $K_{1\ 2}$, $K_{1\ 2}$ и $K_{2\ 1}$. Мы получим: $B_{12}N_1I(\nu)=A_{21}N_2$. Решив это уравнение, придем к соотношению:

$$I(\nu)=\frac{A_{21}N_2}{B_{12}N_1}.$$

Существует замечательный закон: оказывается, если тело находится в тепловом равновесии, то число частиц с энергией E_2 всегда меньше, чем число частиц с энергией E_1, когда $E_2>E_1$, причем $N_2=N_1e^{-\frac{E_2-E_1}{kT}}$, или $\frac{N_2}{N_1}=e^{-\frac{E_2-E_1}{kT}}$. Здесь e — основание натуральных логарифмов — число, примерно равное 2,73. Величина kT — средняя кинетическая (точнее, среднеквадратичная) энергия атома, входящего в состав тела, нагретого до температуры T. Этот закон получен в теоретической физике из простых предположений, но сам вывод слишком сложен. Между тем эту формулу стоит запомнить, она часто используется при выводе различных физических закономерностей (рис. 38). Теперь для зависимости силы света от частоты получим выражение $I(\nu)=\frac{A_{21}}{B_{12}}e^{-\frac{E_2-E_1}{kT}}$. A_{21} и B_{12} просто числа, и, как их ни изменяй, из нашего выражения формула Планка не получится. Но ведь именно формула Планка отражает то, что происходит в природе. В наших рассуждениях тоже нет видимой ошибки. Значит, существует еще какой-то процесс, не учтенный нами. И вот здесь заключена сущность открытия Эйнштейна. Он предположил: из верхнего состояния E_2 в нижнее E_1 атом в некоторых случаях может переходить под действием пролетающих мимо него квантов электромагнитного излучения с энергией $h\nu_{12}$, равной энергии пе-

Рис. 38. По закону $n = n_0 e^{-\frac{E_2 - E_1}{kT}}$ убывает число молекул газа в атмосфере, приходящееся на единицу объема, если высота над уровнем моря увеличивается. E_2 — потенциальная энергия молекулы на высоте H, E_1 — потенциальная энергия на уровне моря. Эта формула справедлива всегда, когда надо определить зависимость числа атомов от их энергии при условии равновесного состояния системы.



рехода K_{1-2}. По Эйнштейну, такие кванты «вынуждают» атомы переходить из верхнего в нижнее энергетическое состояние и испускать при этом подобные себе кванты. Если использовать наши «яблочные» термины, то это означает, что некоторые кванты каким-то путем стряхивают с ветвей яблоки. В таком процессе пролетающий квант не поглощается, а рождается еще дополнительный квант. Число «стряхиваемых» квантов пропорционально количеству атомов N_2, находящихся в верхнем энергетическом состоянии. Эта величина равна $B_{21}N_2$. Так что на самом деле число переходов K_{2-1} равно $A_{21}N_2$ (число яблок, самопроизвольно падающих с ветвей) плюс $B_{21}N_2$ (число яблок, сбитых потоком квантов с энергией $H\nu_{21}$ и интенсивностью $I(\nu)$.

Теперь условие, вытекающее из температурного равновесия твердого тела $K_{1-2}=K_{2-1}$, нужно записать так:

$$B_{12}N_1 I(\nu) = A_{21}N_2 + B_{21}N_2 I(\nu).$$

После простых выкладок вы получите

$$I(\nu) = \frac{A_{21}}{B_{12}e^{\frac{h\nu}{kT}} - B_{21}},$$

если учтете, что $\frac{N_1}{N_2} = e^{\frac{h\nu}{kT}} = e^{-\frac{E_2-E_1}{kT}}$.

Формула для $I(\nu)$ совпадает с формулой Планка, если считать, что $B_{12}=B_{21}$, а отношение $\frac{A_{21}}{B_{12}} = \frac{2\pi h\nu^3}{c^2}$. Но формула Планка верна. Следовательно, и соотношения между коэффициентами A_{21}, B_{12} и B_{21}, приводящие к ней, должны быть справедливы.

Эти результаты и были получены Эйнштейном в 1917 г. Если теперь физик измерял скорость поглощения света (число переходов K_{1-2} за 1 с), то он, опираясь на зависимости, полученные Эйнштейном, мог вычислить скорости вынужденного и самопроизвольного излучений, вычислить величины A_{21}, B_{12} и B_{21} — коэффициенты Эйнштейна, как мы их теперь называем. Рассчитать же теоретически сразу все три коэффициента можно только с помощью квантовой электродинамики, науки, созданной через 10 лет после открытия Эйнштейна.

Потребовалось более 40 лет, чтобы открытое Эйнштейном вынужденное излучение вошло в нашу жизнь и о нем заговорили все. Ведь именно процесс вынужденного, или, как говорят ученые, индуцированного, излучения — физическая основа, на которой были созданы мазеры и лазеры, замечательные источники электромагнитного излучения, благодаря которым совершилась революция во многих областях науки и техники.

Значение слова. Что означает слово «лазер»? Оно составлено из первых букв английского названия, которое в переводе на русский означает «усиление света с помощью вынужденного излучения». В советской научной литературе вместо термина «лазер» часто встречается сокращение ОКГ (оптический квантовый генератор).

Попытаемся разобраться в процессах, протекающих в лазере. Когда атом поглощает фотон — квант световой энергии, его внутренняя энергия увеличивается на энергию поглощенного кванта. Принято говорить, что при этом атом переходит на более высокий энергетический уровень, причем новый уровень лежит выше «старого» на величину энергии поглощенного кванта. Обычно атом стремится перейти в состояние с наименьшей возможной для него энергией. Такое состояние называют основным. Атом, у которого запас энергии больше, чем в основном состоянии, называют возбужденным. Возбужденный атом, как правило, очень быстро избавляется от излишней энергии — всего за одну стомиллионную долю секунды. При этом атом испускает фотон, энергия которого равна $E_2 - E_1$ (рис. 39). Чаще всего атом сам отдает излишнюю энергию без какого-либо внешнего воздействия. Однако, как мы знаем, переход с высшего энергетического уровня на более низкий возможен и под действием пролетающего кванта. Такой квант-фотон как бы увлекает своего «товарища», если энергия возбуждения атома равна энергии свободного фотона. Замечательно, что электромагнитные колебания «похищенного» фотона будут в той же фазе, а также происходить в той же плоскости, что и у фотона-«похитителя». Таким образом, проходящий через вещество с возбужденными атомами световой

Рис. 39. Индуцированное излучение.



поток, энергия квантов которого равна энергии возбуждения, стремится перевести атомы на более низкие уровни.

Отрицательное поглощение. Незадолго до изобретения лазера физики изучали замечательное явление — так называемое **отрицательное поглощение света.** Пучок света, проходя даже через самое прозрачное вещество, всегда ослабляется: какая-то часть фотонов пучка поглощается веществом, и их энергия переходит в тепло. Но нет правил без исключения. В некоторых кристаллах световой луч не ослаблялся, а усиливался! Откуда появилась дополнительная энергия?

Оказывается, перед прохождением светового луча кристалл осветили мощным световым потоком. Благодаря этому значительная доля атомов кристалла перешла в возбужденное состояние. Из возбужденного состояния эти атомы могут перейти на более низкий энергетический уровень, испустив при этом фотон с энергией $h\nu$. Поглотить же фотон с такой энергией они не могут — они уже насытились энергией. Зато фотоны падающего пучка с энергией $h\nu$ увлекают за собой

новые фотоны той же энергии, вынуждая атомы кристалла переходить в низшее состояние. В падающем пучке возникает дополнительная энергия. Такой кристалл с дополнительной подсветкой — первый шаг к лазеру.

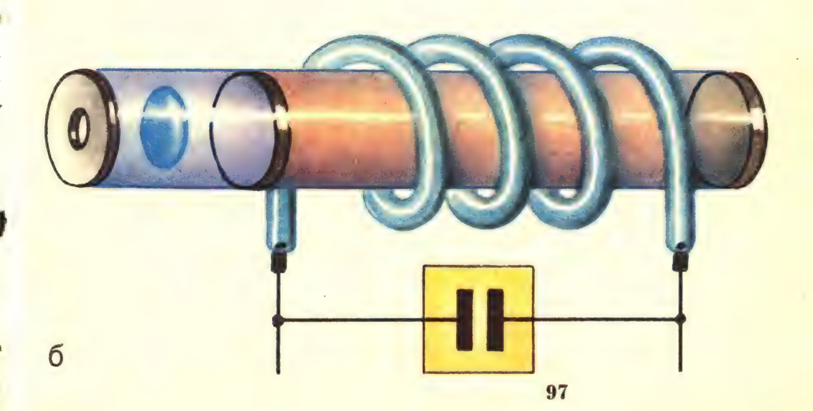
Рубиновый лазер. Первый настоящий лазер был сделан из рубина, когда-то очень редкого камня, который теперь выращивают искусственно в больших количествах. Рубин — кристалл окиси алюминия Al_2O_3, содержащей примесные атомы хрома. Впервые действующий рубиновый лазер был построен в 1960 г. В его активном теле — рубиновом стержне, размерами и формой напоминавшем обыкновенный карандаш, содержалось всего 0,05% хрома. Рубин с такой концентрацией хрома розоватого цвета; если хрома в кристалле больше, то цвет его становится более глубоким, красным. Атомы хрома и играют главную роль в лазерном процессе. Они поглощают желтый и зеленый свет, лучи ультрафиолетовой области спектра. Рубин прозрачен только для красного и синего света. Смесь этих излучений и выходит из рубина, придавая ему характерную «рубиновую» окраску. Два энергетических интервала атома хрома, входящего в состав рубинового кристалла, особенно плотно заполнены энергетическими уровнями. Эти интервалы ab и cd называют **полосами поглощения** (рис. 40а).

Поглотив квант $h\nu_1$, атом хрома переходит на один из уровней, принадлежащих этим полосам. Но там он задерживается недолго, а быстро отдает энергию $\Delta E'$ кристаллической решетке рубина и переходит на низший уровень AA. Этот уровень особый. С него атом длительное время не переходит в основное состояние. По обычным представлениям это время невелико — всего несколько тысячных долей секунды, но в атомных масштабах оно огромно — примерно в сто тысяч раз больше, чем время жизни обыкновенного возбужден-

Рис. 40 а. Условная схема энергетических уровней розового рубина.

Рис. 40 б. Рубиновый лазер.

a
b
c
d
$\Delta E'$
A
A
$h\nu_1$
$h\nu$
$E = h\nu$
а



ного атома. Поэтому такое состояние атома называют **метастабильным.**

Рубиновый стержень мощного лазера — цилиндр диаметром в несколько сантиметров и длиной до нескольких дециметров. Его торцы хорошо отполированы, у одного из них установлено плоское зеркало, полностью отражающее свет, в то время как у другого торца зеркало частично отражает и частично пропускает световые лучи (рис. 40б).

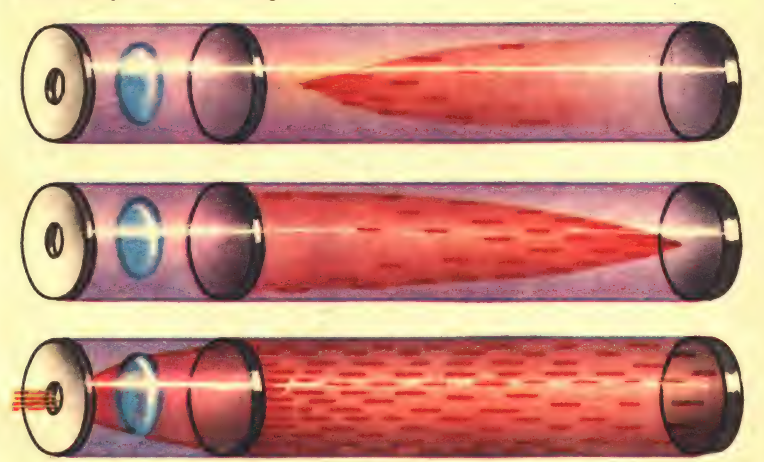
Чтобы получить лазерный импульс, включают установку высокого напряжения. От нее заряжаются электрические конденсаторы. Затем оператор нажимает кнопку, и энергия, запасенная конденсаторами, выделяется на мощных газоразрядных лампах, окружающих рубиновый стержень. Газоразрядные лампы похожи на лампу-вспышку для фотографирования, только они намного мощнее. В следующее мгновение за вспышкой ламп из рубинового стержня вырывается мощный поток света. Если его сфокусировать на металлической пластинке, то лазерный свет «прожигает» в ней глубокий кратер.

Какие же физические процессы произошли в мгновение, которое длился лазерный импульс?

Вспышка газорязрядной лампы сопровождается мощным потоком фотонов разных энергий, которые падают на рубиновый стержень. Атомы хрома, поглотив часть этих фотонов, почти все переходят в возбужденное состояние, а затем примерно за одну стомиллионную долю секунды оказываются на метастабильном уровне AA. В таком состоянии хром остается длительное время (10^{-4} с). Подобный процесс «подъема» атомов хрома или другого элемента в метастабильное состояние (или в иное возбужденное состояние, переходящее затем в метастабильное) называют оптической накачкой.

Из метастабильного состояния атомы испускают спонтанные кванты по разным направлениям. Всякий

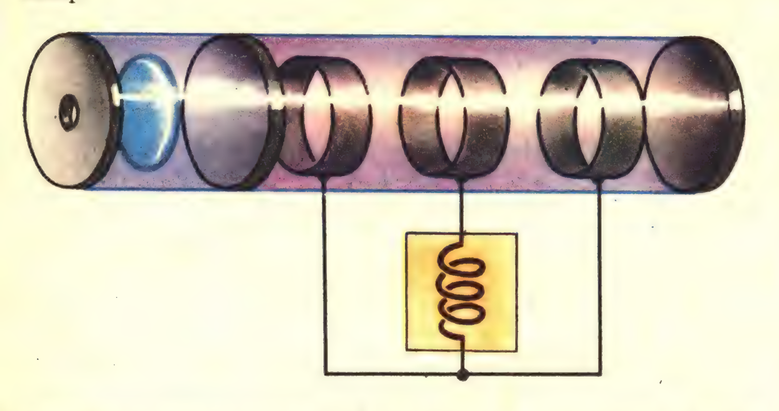
Рис. 41. Возникновение лавины фотонов в лазере.



раз испущенные кванты увлекают за собой новые фотоны, пролетая мимо атомов в метастабильном состоянии. Если спонтанный фотон идет в сторону от оси цилиндра, то все фотоны быстро покидают кристалл, и мощного импульса не получается. Лазерный импульс возникает, когда рождается фотон, летящий вдоль оси лазера. Такой фотон увлекает за собой много фотонов. Число их возрастает по законам возрастания числа камней в горной лавине: фотоны многократно проходят тело рубинового стержня, отражаясь от торцовых зеркал. В результате высвечивается мощный импульс красного света, который выходит через полупрозрачное зеркало (рис. 41).

Свет этого импульса, во-первых, монохроматический; первый испущенный по оси рубинового стержня квант может увлечь за собой кванты только такой же энергии, как у него самого. Во-вторых, лазерный луч расходится под очень малым углом — увлекаемые фотоны идут по тому же направлению, что и первый

Рис 42. Гелий-неоновый лазер.

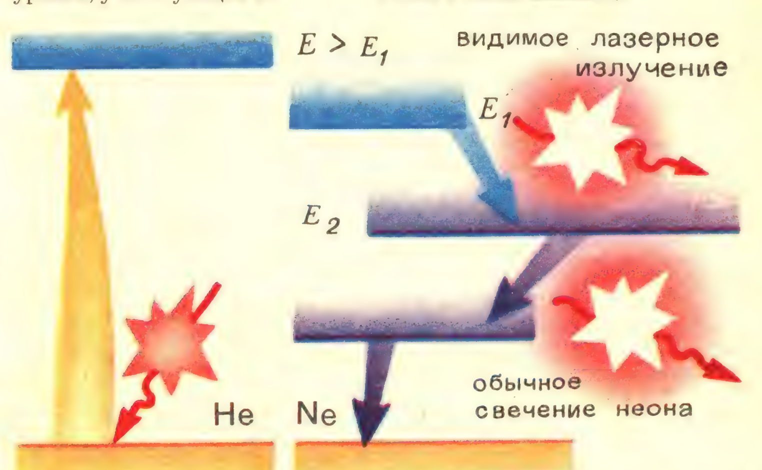


фотон-родоначальник. И наконец, излучение лазера когерентно, потому что все кванты испускаются в одной фазе.

Газовый лазер. Не только твердое тело может давать лазерный свет. Бывают и жидкостные, и газовые лазеры.

Если цилиндрический сосуд наполнить смесью гелия и неона, внутри него поместить металлические электроды и подать на них высокое напряжение, то смесь газов начнет светиться красноватым светом, почти таким же, как и неоновая реклама (рис. 42). В стеклянной трубке возникает тлеющий разряд. В таком разряде между атомами газа движется много быстрых электронов. Они сталкиваются с атомами гелия и возбуждают их. Электроны сталкиваются также и с неоном, но, как правило, возбуждают только низколежащие уровни неона. Зато возбужденные атомы гелия, сталкиваясь с атомами неона, отдают им свою энергию и возбуждают их высокие уровни. С этих высоких уровней атом неона переходит в промежуточное состояние E_1 (рис. 43).

Рис. 43. Схема энергетических уровней гелия и неона. На рисунке показаны только уровни, участвующие в генерации видимого излучения газового лазера. На самом деле схема уровней неона и гелия сложнее.



Если теперь у торцов сосуда с гелий-неоновой смесью установить такие же зеркала, как и у торцов рубинового лазера, то фотон с энергией E_1—E_2, испущенный параллельно оси сосуда, вызовет лазерное излучение. В газовом лазере число возбужденных атомов неона и гелия непрерывно пополняется. Поэтому гелий-неоновый лазер излучает свет непрерывно.

Лазерная жидкость. Очень интересен лазер с жидким излучающим телом. Мы уже знаем, что главную роль в излучающем теле рубинового лазера играют атомы хрома.

Существуют лазеры, у которых стержень не из рубина, а из стекла, а стекло, как иногда говорят, переохлажденная жидкость. Роль атомов хрома играют добавленные в стекло атомы редкоземельного элемента неодима.

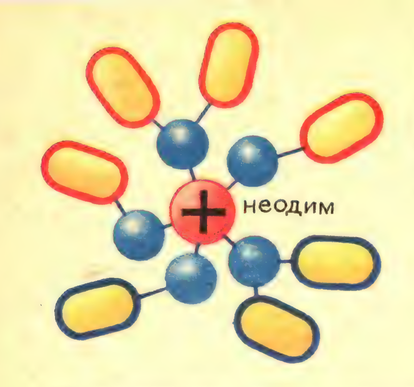


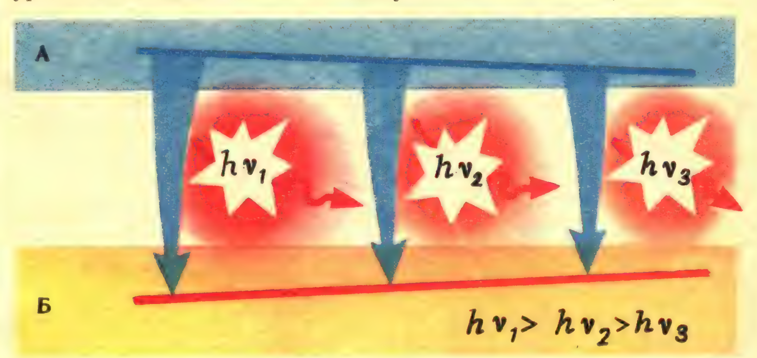
Рис. 44. Ион неодима защищен атомами кислорода и группами органических молекул — лигандами. Подобная защита позволяет удержать энергию возбуждения при столкновениях с другими атомами.

В жидкости атомы неодима будут передвигаться свободнее и очень часто сталкиваться с атомами жидкости-растворителя. При этих столкновениях возбужденные атомы неодима отдадут свою энергию атомам растворителя, и она будет бесполезно теряться и переходить в тепло. Не поможет и то, что электроны, переход которых с орбиты на орбиту сопровождается испусканием фотонов, лежат на большой глубине электронного облака, окружающего атом неодима. Чтобы создать условия для лазерного излучения, нужно как-то защитить активные атомы от снующих вокруг них атомов растворителя. Но как?

Эту задачу решили химики. Они заключили ион неодима в «атомную кольчугу» (рис. 44). Было получено химическое соединение, в котором ион неодима находится среди связанных с ним атомов кислорода, а они в свою очередь связаны со сложными органическими группами атомов — **лигандами.** Таким образом, ион неодима оказался защищенным от столкновений с атомами растворителя и стал вести себя так, как если бы он находился в кристаллической решетке твердого тела.

Но лиганды не ограничиваются ролью защитников неодима. Они обладают еще замечательным свойством. Поглощая излучение в широких областях спектра,

Рис. 45. С энергетической полосы А на энергетическую полосу Б переход может произойти с различных уровней полосы А на различные уровни полосы Б. В зависимости от настройки резонатора можно изменять энергию квантов лазерного излучения.



лиганд возбуждается и при этом либо сразу переходит в основное состояние, либо долго остается в возбужденном состоянии. В первом случае испущенный лигандом фотон будет бесполезным для лазерного луча. Из метастабильного состояния лиганд передает свою энергию атому неодима и таким образом участвует в оптической накачке активных ионов неодима. Каскад фотонов в таком лазере возникает обычным путем, так же как и в других типах лазеров.

Излучающие красители. Очень нужны лазеры, в которых можно регулировать частоту излучения. Они необходимы для многих тонких исследований, когда процесс взаимодействия излучения с веществом в сильной степени зависит от энергии фотонов. Воздействуя на вещество излучением с точно подобранной энергией фотонов, можно управлять сложнейшими механизмами его превращений. Лазеры с изменяемой длиной волны уже созданы. Их излучающее тело — раствор специально подобранных красителей. Генерация света осу-

ществляется на широких полосах поглощения молекул красящего вещества (рис. 45).

Все переходы в таких лазерах осуществляются очень быстро, и движение молекул жидкости не успевает повлиять на лазерный каскад фотонов. Молекулы органического красителя переводятся в возбужденное состояние либо энергией вспомогательного лазера с постоянной частотой, либо специальными лампами. Благодаря большой ширине полос поглощения света в органических красителях открывается возможность плавно менять энергию фотонов, рождающихся в лазерном процессе (рис. 36), стоит только перестроить резонатор на нужную длину волны или изменить частоту источника света, обеспечивающего оптическую накачку.

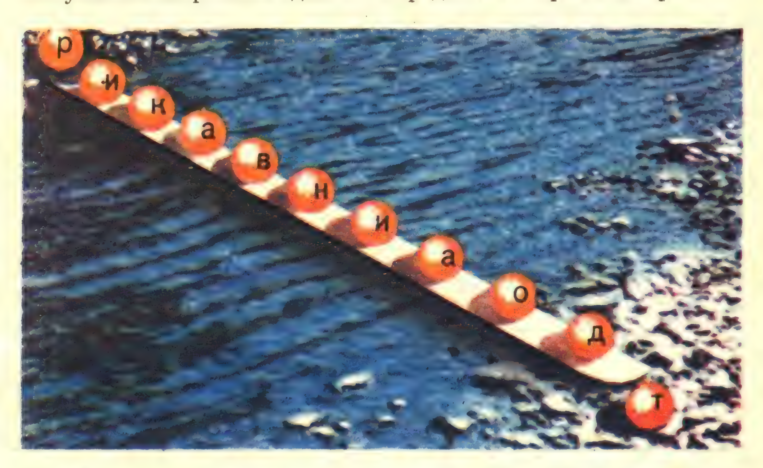
Оптическая связь. Отличие лазерных лучей от обычных не только в их громадной яркости, но еще более в их монохроматичности и когерентности. Только благодаря этим свойствам лазерного излучения в будущем по световому лучу будут передавать программы радио и телевидения.

Чтобы понять, в чем состоят достоинства лазера как передатчика информации, рассмотрим линию связи, изображенную на рисунке 46.

Непрерывно катятся по желобу одинаковые шарики. Число шариков, проходящих с левого берега на правый в единицу времени, а значит, и частота их появления на правом берегу неизменны. Пересчитывая шарики, мы можем сказать, как долго они падали из желоба.

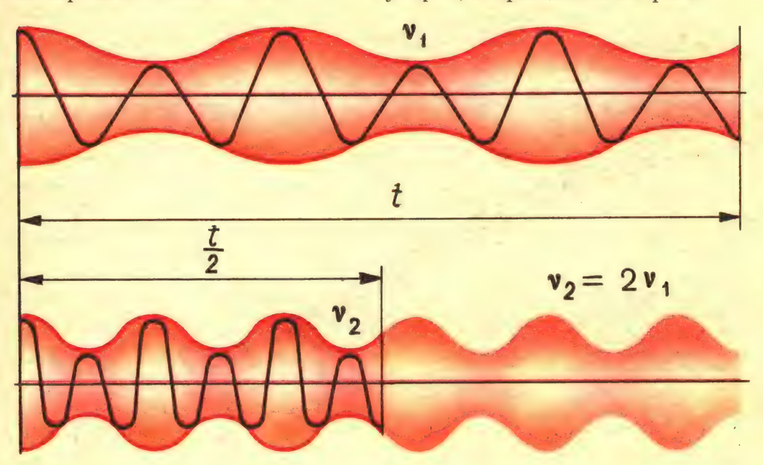
Чтобы передать с помощью такого устройства какое-либо сообщение, нужно пометить шарики, например, буквами алфавита и отправлять и принимать их в определенном порядке. Тогда количество информации (в нашем случае число букв), передаваемое за определенное время, будет пропорционально частоте появления шариков из желоба.

Рис. 46. Шариковый телеграф. Чем выше частота поступления шариков с одного берега на другой, тем большее количество информации передается с берега на берег.



«Неискаженная» синусоида лазерного света подобна чистым шарикам. Зарегистрировав синусоидальное световое колебание каким-либо приемником, реагирующим на свет, мы лишь узнаем, что включен передатчик — излучатель света, а также сможем установить направление, откуда идет излучаемая энергия. Чтобы передать более существенные данные, на синусоиде, как и на шариках, необходимо сделать «метки». Пометить луч обыкновенного света, даже монохроматического, невозможно. Колебания в обычном луче происходят хаотически. На фоне беспорядочных колебаний записать сообщение невозможно. Другое дело — когерентный луч. Он служит как бы чистым листом бумаги, на котором записывается информация. Нанести «метки» можно, модулируя луч, т. е. меняя амплитуду или частоту колебаний (рис. 47). Тогда передаваемое сообщение будет закодировано в «узорах», нанесенных на синусоиду. Чем меньше времени требует передача «узо-

Рис. 47. С увеличением вдвое частоты колебаний электромагнитной волны время, необходимое на передачу одного и того же «узора», сокращается в 2 раза.



ра», тем более емким является канал связи. А это время, как видно на рисунке, обратно пропорционально частоте излучения. Значит, чем выше частота колебаний, тем большее количество информации можно передать за единицу времени. Частота электромагнитных колебаний излучения рубинового лазера 430 ТГц ($4{,}3 \cdot 10^{14}$ Гц) в миллион раз превосходит частоту, на которой в наше время ведутся телевизионные передачи. Поэтому при полном использовании возможностей лазерного луча по нему можно транслировать миллионы телевизионных программ и миллиарды радиопередач.

Однако сегодня ученые еще не нашли способов полностью использовать возможности лазерного луча, — не удается модулировать лазерный луч большим объемом информации. По аналогии с нашим шариковым телеграфом можно сказать, что поток лазерных «шариков» так быстр, что далеко не все удается пометить.

Лазерные электростанции. Как уже говорилось, солнечной энергии обязана Земля своей жизнью, своим развитием. Но солнечная энергия — ядерного происхождения. В центре нашего светила идут термоядерные реакции, рождаются гамма-кванты — кванты энергии, сопровождающие ядерные реакции, энергия которых в миллионы раз превосходит энергию световых квантов—фотонов. Проходя сквозь солнечное вещество, гамма-кванты «дробятся», шаг за шагом, взаимодействуя с атомами вещества, превращаются в кванты более низкой энергии. Поверхности Солнца достигают в основном световые кванты — фотоны. Поток фотонов — энергия солнечного вещества — приходит на Землю слишком рассеянной. Чтобы получить небольшую мощность в 1 кВт в средних широтах, нужно в ясный день собирать энергию с поверхности в несколько квадратных метров. Да и «работает» Солнце нерегулярно, с большими перерывами: то наступает ночь, то небо затягивают облака. Меняется солнечный поток и от времени года. А нельзя ли у нас, дома, на Земле, построить искусственное Солнце?

Во многих случаях, чтобы пошла та или иная химическая реакция или стала заметной скорость ее протекания, реагирующие вещества нагревают. Скорость молекул с ростом температуры увеличивается, и при столкновениях быстрые молекулы преодолевают энергетический барьер, препятствующий образованию из них новых молекул — продуктов реакции. В изотермических реакциях при этом выделяется дополнительная энергия. Солнечная энергия возникает в ядерных реакциях, когда из ядер водорода образуется гелий.

В земных условиях значительно проще осуществить экзотермические ядерные реакции на тяжелых ядрах водорода (дейтерия и трития), чем на ядрах обычного водорода. Чтобы пошли ядерные реакции на смеси трития и дейтерия, вещество нужно нагреть до очень высоких температур, достигающих сотен миллионов граду-

сов. Дело в том, что атомные ядра тяжелого водорода сливаются в ядра гелия только после соприкосновения.

Как заставить коснуться два заряженных положительным электричеством ядра, отталкивающихся друг от друга на малых расстояниях с очень большой силой? Для этого водородные ядра должны лететь друг другу навстречу с очень большой скоростью. Такие условия и возникают, когда водород нагрет до многих миллионов градусов — чем больше температура, тем больше скорость. Впрочем, о водороде при таких температурах говорить не приходится. С ростом температуры наступает момент, когда атомы, сталкиваясь, теряют электроны. Образуется смесь из атомных ядер и электронов, которую называют **плазмой.**

До недавнего времени плазму нагревали электрическим разрядом. Температура плазмы остается высокой, если плазма не соприкасается со стенками камеры, где протекает ее нагревание, и не отдает им энергию. Удержание плазмы от контактов с холодными стенками осуществляется магнитными полями. Но удержать плазму весьма сложно даже с помощью очень сильных магнитных полей. Может быть, есть другие способы получения горячей плазмы?

Лазерная плазма. Ни один из существующих сегодня источников не может обеспечить такой концентрации энергии, как лазерный луч. Мощность импульсного потока интенсивного лазерного излучения в пересчете на 1 см^2 достигает $\sim 10^{16}$ Вт/см^2. Нетрудно понять грандиозность этой цифры, если сравнить цифру 10^{16} Вт с мощностью больших электростанций. На деле полная энергия, выделяющаяся во вспышке лазера, невелика — вспышка длится всего 10^{-9} с, а площадь, на которой концентрируется поток, измеряется в квадратных микрометрах. Но для достижения высоких «термоядерных» температур требуется высокая плотность энергии.

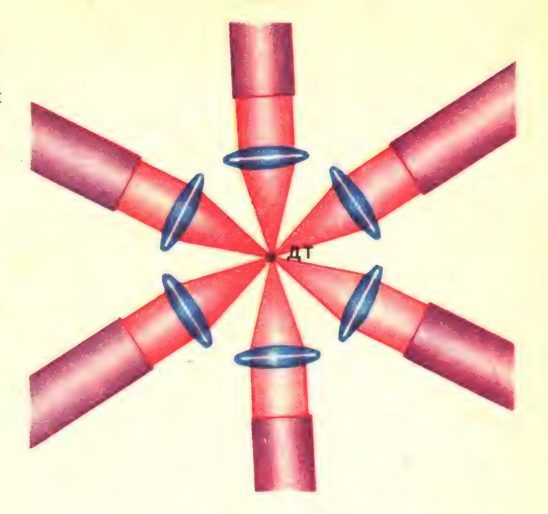


Рис. 48. Для того чтобы в дейтериево-тритиевой льдинке пошла термоядерная реакция, льдинка должна нагреваться лазерным излучением со всех сторон (на рисунке все фокусирующие линзы расположены в одной плоскости, на самом деле льдинка должна освещаться системой линз, расположенных в трехмерном пространстве).

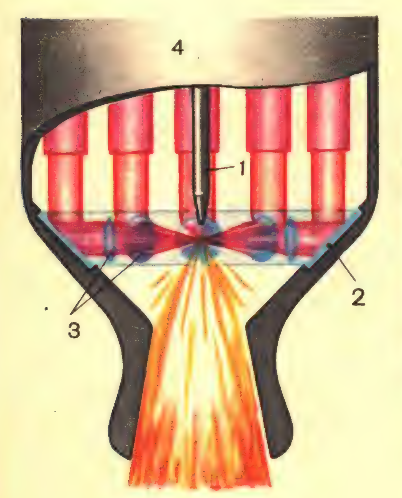
Не удивительно, что ученые работают над тем, чтобы применить мощный лазерный луч для нагрева водородной плазмы до сверхвысоких температур, нужных для протекания термоядерных реакций.

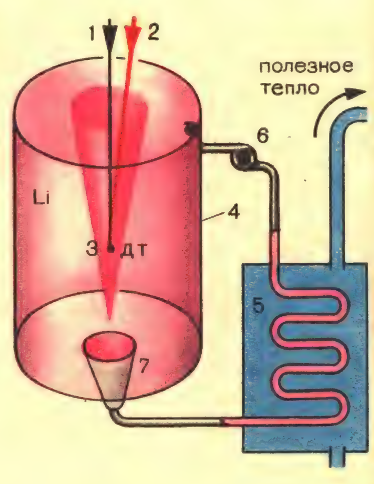
Вот один из проектов. Льдинка из тяжелой воды размером в несколько десятков микрон освещается со всех сторон лазерным излучением (рис. 48). Если в коротком импульсе ($\sim 10^{-9}$с) лазера будет излучаться мощность $\sim 10^4$ Дж, то при специально подобранной форме импульса плазма, образовавшаяся из льдинки, будет очень сильно сжата, так что плотность возрастет в несколько тысяч раз. В нагретой и сверхплотной капельке возникнут условия для протекания термоядерной реакции. Хотя льдинка и невелика, она даст при ядерном «сгорании» дополнительную энергию. По расчетам за каждый импульс эта энергия будет от 10 до 100 млн. Дж. Ведь превращаясь в гелий, 1 г дейтериево-тритиевой смеси освобождает столько же энергии, сколько выделяется при сгорании 20 т нефти.

Рис. 49. Схема космического реактивного двигателя с термоядерным реактором и лазерным поджигом цепной термоядерной реакции:
1 — ввод для ядерного горючего — ДТ-льдинок; 2 — зеркало, направляющее лазерный луч на линзу; 3 — линза, фокусирующая излучение на льдинке; 4 — корпус ракеты.

Рис. 50. Схема стационарной электростанции с термоядерным реактором и лазерным поджигом: 1 — путь льдинок с ядерным горючим;
2 — лазерный луч, поджигающий льдинку;
3 — льдинка в месте поджига;
4 — корпус реактора, наполненный жидким литием;
5 — теплообменник (тепло, выделившееся в термоядерной реакции, переносится к паровым турбинам электростанции); 6 — насос, перекачивающий литий;
7 — воронка, образованная благодаря вращению массы лития.

Льдинки ДТ-горючего вводятся в воронку в массе вращающегося жидкого лития. Время от времени ДТ-льдинки поджигаются лазерным лучом. Нагретый литий поступает в теплообменник.





Главная задача, которая встает перед учеными, когда они начинают проектировать лазерное термоядерное устройство, — как построить мощный лазер с большим коэффициентом полезного действия. В таком лазере значительная доля энергии накачки должна переходить в энергию лазерного излучения. Сегодня больше всего подходит для нагревания плазмы лазер с газообразным излучающим телом — углекислым газом. Лазер на углекислом газе испускает инфракрасное излучение с длиной волны 10,6 мкм.

Для полетов на дальние планеты, а тем более к звездам непригодны двигатели, работающие даже на лучшем химическом топливе, — слишком большой запас горючего пришлось бы брать на ракету, стартующую, скажем, на Плутон. А вот лазерный термоядерный двигатель оказывается вполне подходящим для сверхдальних полетов в космос (рис. 49). Лазер подходит и для поджига термоядерного горючего стационарной электростанции, сжигающей дейтерий и тритий (рис. 50).

Когда же световой луч запустит термоядерную реакцию двигателя сверхдальней ракеты и подожжет термоядерную топку водородной электростанции?

Сегодня трудно называть точные даты. Ученые делают только более или менее достоверные предположения. Считается, что в будущем мощные лазерные электростанции смогут давать промышленности электрическую энергию. Будущее покажет, насколько справедливы эти прогнозы. Но и сегодня ясно, что лазер станет мощным орудием решения энергетических проблем, встающих перед человеком.

Объемный мир голографии. Ныне главный хранитель оптической информации — фотография. Кинокамера или фотоаппарат запечатлевают образы государственных деятелей, ученых, космонавтов, важнейшие исторические события, произведения искусства и многое другое. Научная фотография позволяет изучать



Рис. 51. «Профессии» лазера.

сложные процессы, исследуемые в лабораториях и осуществляемые на производстве, обнаруживать полезные ископаемые и предсказывать ожидаемый урожай.

Сегодня изображения, как правило, мы получаем с помощью фотографии. Но если лет пятнадцать назад у фотографии не было сколько-либо серьезного конкурента, то в наши дни возник и быстро развивается новый способ получения изображений предметов — **голография.**

Голографическое изображение предмета содержится в голограмме, которая играет такую же роль в голографии, как негатив в фотографии. Голограмма по внешнему виду обычная проявленная фотопластинка, на которой изображена картина, ничуть не напоминающая очертания запечатленного на ней предмета. Если рассматривать такую пластинку через микроскоп, то будут видны чередующиеся темные и светлые полосы, если на ней отображен несложный предмет. Сложные сюжеты представятся зернистой структурой из светлых и темных участков.

Стоит только осветить голограмму ярким пучком света, как возникает цветное объемное изображение предмета. Освещая запутанную структуру, изображенную на пластинке, мы восстанавливаем когда-то отраженный предметом фронт световой волны, и этот фронт полностью повторяет падавший ранее на пластинку. Восстановленное изображение расположено под углом к освещающему пучку, за голограммой.

Но на этом чудеса не кончаются. Голограмму можно разбить на части, и каждый осколок при просвечивании воссоздаст такую же картину, как прежде воссоздавала вся пластинка. Уже созданные голограммы шедевров мирового искусства, редких предметов, ничем не отличающиеся от оригиналов, стали доступны для всех.

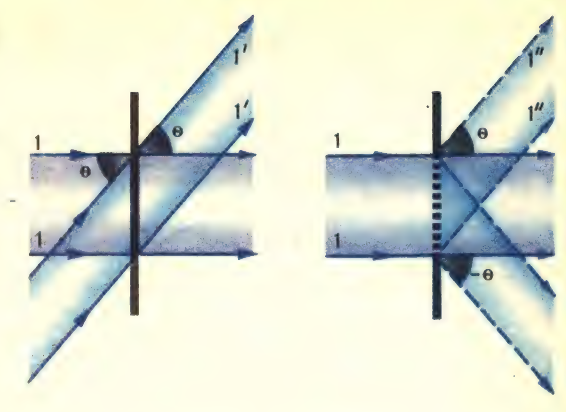
Новые возможности голография открывает в научных исследованиях и техническом контроле на производстве.

На голограмме положение отдельных малых элементов предмета регистрируется по запаздыванию лучей, отраженных от этих элементов. Расстояние от отдельных точек предмета записывается путем сравнения двух лучей света: опорного и предметного. Два пучка света — идущий от предмета (предметный) и другой (опорный) — направляются на фотопластинку, где они создают интерференционную картину. Интерференционная картина в большом объеме пространства возникает только при взаимодействии когерентного света. Поэтому голография без лазерного когерентного излучения не могла бы получить настоящего развития.

Голографическая «запись». Как же записывают голограмму? Осветим фотопластинку двумя когерентными пучками света. Один из них (1) направим перпендикулярно к поверхности пластинки, а другой (1′) — под углом Θ. Тогда, складываясь, световые колебания дадут на пластинке систему интерференционных полос (рис. 52а). После проявления пластинка представит собой дифракционную решетку. Осветим полученную решетку перпендикулярным к ее поверхности пучком когерентного света (1). Часть энергии этого пучка пройдет через щели решетки, не изменив направления, и, кроме того, возникнут еще два параллельных пучка света, распространяющихся под углом Θ и −Θ к поверхности пластинки. Эти углы будут в точности такими же, как и угол, под которым освещалась пластинка, а интенсивность пучка (1″), идущего под углом Θ, будет такой же, как и ранее падавшего на пластинку (рис. 52б). Иными словами, фотопластинка запомнила, под каким углом и с какой интенсивностью на нее падал луч. Этот старый луч восстанавливается под действием перпендикулярного луча, называемого опорным.

Рис. 52 а. Схема записи голограммы.

Рис. 52 б. Схема воспроизведения голограммы.



Возможность восстановления первичного светового пучка с помощью опорного луча приводит к далеко идущим последствиям. Оказывается, с помощью когерентного излучения на фотопластинке можно записать не только характеристики параллельного пучка света, но и свет, отраженный лепестками розы, мраморной колоннадой или хрустальной вазой, а потом восстановить эту «запись».

Освещенный или светящийся предмет всегда можно представить как совокупность отдельных светящихся точек. Поэтому если научиться записывать на фотопластинке свет одной точки, то можно записать и свет, испускаемый самым сложным объектом. Свет от светящейся точки падает на фотопластинку конусом (рис. 53а). Разобьем этот конусообразный пучок на очень узкие кольца, такие, что расходимостью лучей в них можно практически пренебречь. Это означает, что каждый узкий пучок мы можем считать как бы параллельным.

Фотопластинка на участке A_1B_1 запомнит пучок, падавший на нее под углом φ_1, на участке A_2B_2 — под углом φ_2 (рис. 53 б). Чем больше угол, тем чаще дифрак-

Рис. 53. Получение голограммы точечного объекта K (а). Восстановление изображения точки K при освещении голограммы когерентным светом опорного лазерного луча (б).

ционные полосы, тем больше «штрихов» приходится на единицу длины пластинки. Если после такого освещения проявить пластинку и вновь осветить ее опорным пучком когерентного излучения, то возникает точно такой же световой поток, который падал на пластинку до ее проявления от точечного источника. Таким путем мы с вами решили задачу записи светового потока, отраженного малым участком предмета, который можно принять за точечный источник света. Отраженный всем предметом световой поток пластинка запомнит как сумму потоков от малых частей предмета — отдельных точек, испускающих или отражающих свет.

Полосы на пластинке будут очень сложными и, конечно, совсем не будут напоминать сам предмет, так же как система правильных полос вовсе не похожа на параллельный пучок света.

Допустим, фотопластинка с записанной на ней голограммой разбилась. И все же любой осколок этой пластинки, освещенной опорным светом, восстановит изображение. Это станет понятным, если посмотреть на рисунок 53. В самом деле, части A_1B_1 и A_2B_2 пластинки независимо создают изображение точки K. Правда, с уменьшением размеров голограмм качество изображения ухудшается.

Опорный световой пучок воссоздает объемное изображение предмета, и даже не такое, какое мы видим на стереоснимках, когда создается иллюзия объемного изображения. На обычном стереоснимке никаких новых подробностей мы не увидим, рассматривая его под разными углами зрения. А голографическое объемное изображение позволяет рассмотреть предмет со всех сторон. Можно заглянуть и за предмет и увидеть то, что находится за ним.



а
K
K
K'
φ1
φ2
A1
B1
A2
B2
б

Можно создать и объемную голограмму. В этом случае интерференционная картина когерентных пучков записывается в толстослойной эмульсии. Объемная голограмма еще более полно, чем плоская, отображает объемный мир. На стадии восстановления восприятие изображения предмета совершенно не отличается от восприятия самого предмета. Человек, наблюдающий восстановленное изображение предмета, ощущает своеобразный эффект присутствия.

Удивительные возможности открывает голография. Если снять фильм, где каждый кадр — голограмма, то получится объемная кинокартина необыкновенно высокого качества.

Пройдет не так уж много времени, и ученые и инженеры смогут создать установки, передающие голограммы на большое расстояние. Будет осуществлено объемное телевидение. Происходящие за многие тысячи километров события можно будет перенести в зрительный зал. Но не только кино и телевидение станут иными. Преобразятся и наши библиотеки. На одну пленку голограммы можно записать более ста страниц текста.

Удивительные превращения. Еще со времени Ньютона считалось, что свет должен проходить через прозрачное вещество, не меняя частоты колебания.

Поведение светового пучка в веществе полностью определяется его частотой и показателем преломления среды, если не учитывать явлений, связанных с поляризацией света. Но если осветить кварцевую пластинку мощным световым потоком рубинового лазера, то в луче, прошедшем кварц, появятся колебания с частотой, отличной от частоты красного света лазера. В этом можно убедиться, направив луч на призму. В луче кроме красного окажется и синий свет с длиной волны 0,347 мкм (рис. 54а).

Откуда взялось новое излучение? Оказывается, взаимодействие света с веществом может послужить при-

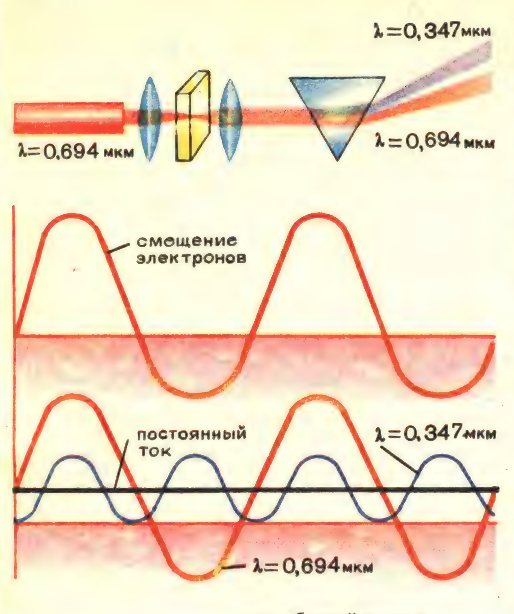


Рис. 54 а. Прохождение мощного лазерного луча через кварцевую пластину. **Рис. 54 б.** Смещенные электроны начинают колебаться; возникают излучения с частотой падающего света и с удвоенной частотой. Сумма этих колебаний воспроизводит кривую смещения электронов. Кроме светового излучения при несимметричном смещении электронов возникает постоянный электрический ток; если электроны смещаются электрическим световым полем симметрично, то может возникнуть свет с частотой колебаний втрое большей, чем частота падающего света.

чиной изменения частоты света. В световой волне колеблются электрическое и связанное с ним магнитное поля. Напряженность электрического поля солнечного луча в хорошую погоду у земной поверхности составляет около 1000 В/м. Такая незначительная напряженность электрического поля может сдвигать только очень слабо связанные электроны атомных оболочек. Под действием света в веществе возникают колебания электронов с частотой, равной частоте колебаний в падающем световом луче. Эти колебания создают вторичное световое излучение с той же частотой. Поэтому, проходя через вещество, солнечный свет не может вызвать появления новых частот в спектре.

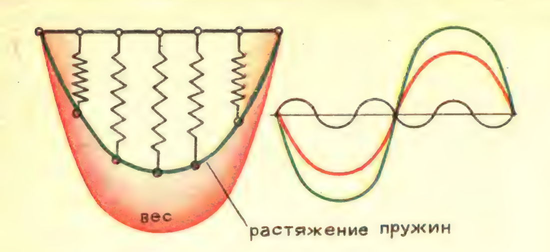


Рис. 55. Действие лазерного излучения на атомные электроны.

Однако в фокусе линзы, собравшей лазерный луч, напряженность электрического поля световой волны может достигать 1 млрд. В/см. Такая мощная световая волна не только сдвигает электроны внешних атомных оболочек, но вызывает и более существенные изменения. У кристаллов, не имеющих центра симметрии, электроны в одну сторону будут сдвинуты сильнее, чем в другую (рис. 54б). Положение смещенных электронов теперь уже не повторяет форму падающей волны. Колеблясь, смещенные таким образом электроны создадут две световые волны: с частотой падающего света и с вдвое большей частотой. Появится еще и постоянный электрический ток! Может случиться и так, что электроны сместятся одинаково в обе стороны, но при этом их смещение не повторит форму падающей световой волны.

Посмотрим на пружины (рис. 55). Все они одинаковы по своим характеристикам. Допустим, что к первой подвешен груз массой 5 кг, ко второй — массой 8,7 кг, а к третьей — массой 10 кг. Под действием веса груза первая пружина растянулась на 5 см, а вторая растягивается только на 8,6 см, хотя на нее действует вес гири массой 8,7 кг. Третья пружина опускается вместо 10 см на 9,5 см. Наши грузы теперь не повторяют закона, по которому подобран их вес, пропорциональный массам грузов. С увеличением прикладываемой силы пружина начиная с определенного момента оказывает большее

сопротивление растяжению, чем вначале. Так же и электроны в атомах.

Можно представить, что они прикреплены к атомному ядру как бы на пружинах. Конечно, на деле их удерживают в атоме электрические силы, но эти силы по своему действию подобны нашим пружинам. Таким образом, когда напряженность электрического поля световой волны велика, смещение электронов, так же как и смещение гирь, не повторяет форму падающей волны. На рисунке 55 мы видим, что такую смещенную цепочку электронов можно представить двумя синусоидами; у одной длина волны такая же, как и у падающего света, а у второй — втрое короче. Облучая кальцит мощным лучом рубинового лазера, можно получить излучение с длиной волны 0,2314 мкм, т. е. втрое меньшей, чем длина волны рубинового лазера.

Но если в веществе интенсивный лазерный луч распространяется по-иному, то он и преломляется в веществе, и отражается от поверхности тела не так, как обычный: появляются фотоны большой энергии. Вещество, пропускающее свет обычной силы, становится непрозрачным для мощного пучка. Все эти явления образовали новый раздел физики, называемый **нелинейной оптикой.**

Наука о свете. Над тайнами светового потока размышляли многие поколения ученых. Создавались замечательные теории, объяснявшие оптические явления. Для их проверки ставились тонкие и изящные опыты...

Оптические приборы не только давали сведения о свете, но и внесли вклад в изучение практически всех областей науки. Ведь большая часть сведений о внешнем мире поступает в наш мозг благодаря зрению. Оптические приборы и методы позволили проникнуть в такие тайны природы, которые невозможно постигнуть без оптики.

Еще древним грекам был известен закон о прямолинейном распространении света. Ньютон доказал, что белый свет сложный, разложив его на цветные составляющие. Предположение Гюйгенса о волновой природе света блестяще развил Френель. Современные теоретические представления возникли благодаря трудам гениального Максвелла, который доказал, что свет — поток электромагнитной энергии. Изучение оптических явлений оказало решающее влияние на развитие теоретической физики. Ученые, исследуя излучения накаленных тел и линейчатые спектры паров и газов, создали **квантовую механику** — основу всей современной теоретической физики.

Квантовая механика, возникшая как наука при исследовании оптических явлений, объясняет не только строение атома, но и строение атомных ядер, их структуру, процессы радиоактивного распада, рождения новых элементарных частиц. На ее основе созданы теории твердого тела и жидкостей.

В наше время энергия света играет большую роль и в технике. Громадное значение имеют оптические изме-

рения, спектральный анализ, голографические методы исследования.

В перспективе наибольшие успехи в развитии оптики связывают с применением лазеров. Если пятнадцать лет назад лазерные лучи несли весьма скромные мощности, то сегодня луч лазера с большой скоростью разрезает стальной лист, разрушает сверхпрочные горные породы при проходке тоннелей и шахт, в плохую погоду ведет на посадку самолеты, воссоздает с невиданной полнотой образы самых разнообразных предметов, помогает снимать карты местности (рис. 51).

Лазеры расширили применение оптических методов в метрологии и геодезии. Острый лазерный луч незаменим для определения точного положения деталей при монтаже сложных, больших установок, таких, как радиотелескопы или арматура для сборки самолетов, автоматического контроля проходки тоннелей, съемки профиля взлетных полос на аэродромах. Лазером сваривают кузова автомобилей, «сверлят» отверстия в лопатках турбин, режут керамику и стекло, контролируют загрязнение окружающей среды.

Появилось понятие «лазерная технология»: когерентное оптическое излучение ускоряет производство химических продуктов, выращивание больших кристаллов для современной радиоэлектроники, обеспечивает разделение изотопов.

Лазеры перспективны для космической связи. Уже сегодня лазерный луч может донести информацию до самых дальних планет Солнечной системы, управлять дистанционно космическими аппаратами в области Нептуна и Плутона. В будущем, по-видимому, именно с помощью лазера будет возможна межзвездная связь — связь с космическими объектами вне Солнечной системы.

Лазерная ракета. По-видимому, потребуется не так уж много времени, когда в нашем распоряжении ока-

жутся могущественные световые потоки. Станет реальным решение таких проблем, о которых мы только еще мечтаем.

Допустим, что обыкновенный карандаш — готовая к старту в космос ракета. В принятом нами масштабе весь полезный объем ракеты, объем космического корабля, придется на отточенный кончик карандаша — современная ракета неизмеримо тяжелее груза, который она способна вывести в космос. Как увеличить соотношение между массой полезного груза и ракеты-носителя?

Оказывается, под действием мощного лазерного луча вещество может испаряться с такой стремительностью, что струя горячего пара будет со сверхзвуковой скоростью отталкиваться от экрана, на который направлен луч. Возникает реактивная сила, во много раз превосходящая силу современного реактивного двигателя, приходящуюся на грамм израсходованного горючего, а именно горючее и составляет основной вес ракеты сегодняшнего дня. По расчетам получается, что в лазерном варианте космический корабль и ракета-носитель будут соизмеримы по своему весу.

Пока еще нет лазеров, мощность которых оказалась бы достаточной для запуска на орбиту тяжелого спутника. Но что бы мы могли ожидать, если бы ракетные лазеры были построены?

На околоземные орбиты можно было бы выводить громадные грузы, создавать там сооружения, о которых сегодня мы только мечтаем. Скажем, орбитальную обсерваторию, оснащенную мощными телескопами, совершенной аппаратурой для изучения состава звездного света. Перед телескопом такой обсерватории не было бы атмосферы, и космический свет без всяких искажений попадал бы на анализирующие приборы. Сегодня даже телескопы, установленные высоко в горах, работают на полную мощность лишь в особых, благоприятных условиях — остальное время вещество атмосферы искажает информацию, содержащуюся в

звездном свете. Поэтому космическая обсерватория откроет многие тайны Вселенной: неизвестные галактики, звезды, состав отдаленных космических тел.

Лазерная энергетика. Если же говорить о полетах к далеким планетам, например к Нептуну или Плутону, то ракета-носитель должна быть оснащена двигателем на термоядерном топливе. И здесь лазерный свет нагреет плазму до температур, при которых разгорается термоядерная реакция, и энергия атомного ядра, выделившаяся в процессе термоядерного синтеза, послужит для продвижения человека в самые отдаленные места Солнечной системы.

Уже сегодня ученые думают о машине, в которой механическая энергия будет превращаться в лазерное излучение с высоким коэффициентом полезного действия. Тогда по узким каналам без проводов энергия потечет и к космическому аппарату, и к самолету. Подключенный к лазерной энергетической линии воздушный лайнер будет перевозить громадные грузы. В прошлое уйдут бензозаправщики.

Квантовый катализатор. С участием света в листьях растений протекают важнейшие химические реакции. Продукты этих реакций обеспечивают существование всего живущего на Земле. Мы поддерживаем свою жизнь, питаясь растениями или травоядными животными, и, по существу, пользуемся свойствами хлорофилла поглощать световую энергию Солнца. Эти же реакции (их называют фотохимическими) — основа фотографии и многих других химических превращений. В этих реакциях световая энергия управляет химическим процессом. Изобретение лазера дало в руки ученым исключительно тонкий инструмент для управления химическими реакциями. Так, лазерный свет со строго определенной энергией квантов может возбуждать только молекулы, в которых содержится обыч-

ный водород, а точно такие же молекулы, в которых вместо атома легкого водорода связан тяжелый дейтерий, подвергаться действию лазерного луча не будут. При этом возбужденные молекулы вступают в реакцию со специально подобранным веществом и выпадают в осадок. В результате раствор обогащается дейтерием. Точно настроенное на частоту колебаний молекул, лазерное излучение открывает путь к разделению изотопов водорода химическими средствами. А ведь в обычных химических реакциях молекулы, содержащие дейтерий и обычный водород, ведут себя совершенно одинаково. Получается, что лазерный свет помогает химикам разделять вещества, почти не отличающиеся по своему химическому поведению.

Лазерный свет может разрывать определенные химические связи молекул, и в этом случае реакция пойдет по иному пути, чем при нагревании веществ, когда молекулы реагируют благодаря энергии теплового движения.

Лазерная химия — химия будущего. С ее развитием упростится синтез сложных органических веществ, появятся новые красители, станут более эффективными лекарства.

Оптическая вычислительная машина. В наши дни вычислительные машины управляют технологическими процессами, берут на себя роль учетчиков и контролеров, корректируют полет спутников, рассчитывают оптические системы и железнодорожные мосты. Число и сложность задач возрастают с каждым годом. Чтобы машины справлялись, приходится повышать их действие.

Сегодня инженеры пытаются заставить ЭВМ выполнять сто миллионов операций в секунду. Разрабатывают новые полупроводниковые элементы, совершенствуют транзисторные схемы. И все же основой самых быстрых машин станут лазерные устройства. Оптиче-

ская вычислительная машина сможет работать со скоростью более миллиарда операций в секунду! И «память» у такой машины будет оптической, основанной на голографической записи данных. Ведь на пластинке размером 10 × 10 см можно записать, пользуясь голографией, миллион страниц печатного текста.

Голография, оптические вычислитель-
ные машины, лазерный термоядерный
синтез, лазерная химия и многие другие новые
применения светового потока позволят
в будущем получать больше энергии,
разумнее ее расходовать,
глубже познавать
окружающий
мир.





Содержание

Издательство «Педагогика»

Свет

Владислав Иванович Кузнецов

Для среднего и старшего школьного возраста

Художник
Радаев В.

Фотограф
Шерстенников Л.

Макет художника
Радаева В.

Заведующая редакцией
Т. Ляхова

Редактор
О. Владимирская

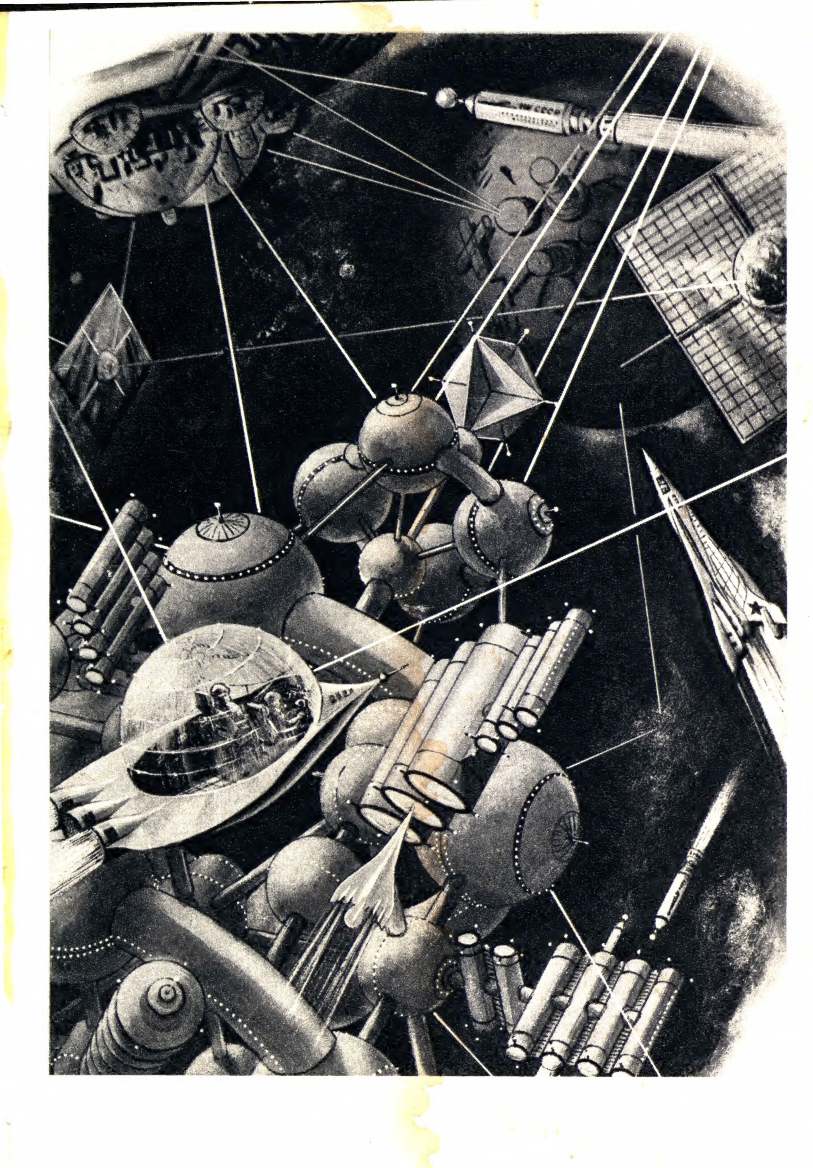
Художественный редактор
В. Храмов

Технические редакторы
И. Пономаренко,
О. Самойлова

Корректор
В. Антонова

ИБ № 151
Сдано в набор 4/X 1976 г. Подписано в печать 3/XI 1977 г. А14553. Формат 70×100/32. Бумага офсетная № 2. Печ. л. 4. Усл. печ. л. 5,16. Уч.-изд. л. 5,72. Тираж 200 000 экз. (Т. п. 1977 г. № 39). Заказ № 2238. Цена 40 коп.

Издательство «Педагогика» Академии педагогических наук СССР и Государственного комитета Совета Министров СССР по делам издательств, полиграфии и книжной торговли.
Москва, 107066, Лефортовский пер., 8.
Ордена Трудового Красного Знамени Калининский полиграфический комбинат Союзполиграфпрома при Государственном комитете Совета Министров СССР по делам издательств, полиграфии и книжной торговли.
г. Калинин, пр. Ленина, 5.



40 коп.

Читайте
следующую
книгу библиотечки
«Ученые — школьнику»!

«Это было море ошибок — и истина в нем тонула!» — так сказал однажды французский химик Жорж Урбэн, вспоминая об исследованиях химии редкоземельных элементов.

Эти металлы составляют почти 1/6 часть всех известных ныне элементов. Они удивительно похожи друг на друга, и даже сейчас их разделение представляет собой нелегкую задачу.

Их считали редкими, а на самом деле они достаточно широко распространены в природе.

Их считали бесполезными, а сейчас они применяются во многих областях науки и техники.

Их история не насчитывает еще и 200 лет, но нет ей равной в истории химических элементов по сложности и запутанности

Об этом удивительном семействе химических элементов вы сможете прочитать в книге доктора химических наук **Д. Н. Трифонова «Цена истины».**